

**Руководство пользователя  
по применению комплектного  
распределительного устройства  
с элегазовой изоляцией (КРУЭ)  
на номинальное напряжение 72,5 кВ  
и выше**

**CIGRE WG 23-10**

Рабочая группа 03

У. Качинский, У. Боек, Р.К. Болин, А. Де Геус, Х. Хисингер, П.-А.Холт, Ю. Мураяма,  
Дж. Джоунс, О.Кнудсен, С. Кобайши, Д. Копейткова, Б. Маззолени, Б. Приор,  
А.С. Сахни, Дж.-П. Тейллейбойс, К. Чаннен, П. Уэстер



**Руководство пользователя по применению комплектного  
распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ)  
на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше**

**Декабрь 1997 г.**

<b>0</b>	<b>Введение</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Выполнение проекта КРУЭ – планирование и технологический процесс</b>	<b>8</b>
1.1	Введение	8
1.2	Начальный этап проекта	8
1.3	Выбор между КРУВ, КРУЭ и комбинированными установками	10
1.4	Определение предварительной конфигурации КРУЭ	10
1.5	Другие исследования	10
1.6	Подготовка заявки на участие в конкурсе	11
1.7	Оценка конкурсных заявок, переговоры между пользователем и изготовителем	11
1.8	Рабочий проект и утверждение проекта	12
1.9	Период изготовления	12
1.10	Монтаж, проверки на рабочей площадке, ввод в эксплуатацию и официальная приемка	12
1.11	Обучение обслуживающего персонала	13
1.12	Вопросы эксплуатации и послепродажное обслуживание	13
1.13	Процесс вывода из эксплуатации	13
<b>2</b>	<b>Критерии выбора КРУЭ</b>	<b>13</b>
2.1	Преимущества КРУЭ	13
2.1.1	Влияние окружающих условий на коммутационную аппаратуру	15
2.1.2	Влияние коммутационной аппаратуры на окружающую среду	16
2.2	Обеспечение качества и надежность	16
2.3	Безопасность	17
2.4	Стоимость срока службы	17
2.5	Заключение	18
<b>3</b>	<b>Конфигурация КРУЭ</b>	<b>18</b>
3.1	Выбор типа КРУЭ	18
3.1.1	Тип конструкции	18
3.1.2	Объем деталей с элегазовой изоляцией	19
3.1.3	Условия эксплуатации	21
3.2	Конструкция однолинейной схемы	23
3.3	Схема размещения компонентов	24
3.4	Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	25

3.4.1	Основные исходные данные пользователя	25
3.4.2	Основные исходные данные изготовителя	26
3.4.3	Оптимизация	26
<b>4</b>	<b>Координация изоляции</b>	<b>26</b>
4.1	Общая информация	26
4.2	Характеристика пробоя элегаза	27
4.3	Процедура координации изоляции	27
4.4	Определение выдерживаемого напряжения	29
4.5	Действия, которые можно предпринять для достижения координации изоляции	29
4.6	Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	30
<b>5</b>	<b>Основные компоненты</b>	<b>31</b>
5.1	Проводник	31
5.2	Оболочка	31
5.2.1	Оболочка для трех фаз или одной фазы	32
5.2.2	Разделение газовых зон	32
5.2.3	Изоляционные прокладки	32
5.2.4	Устройства сброса давления	32
5.3	Коммутационные устройства	33
5.3.1	Силовые выключатели	33
5.3.2	Другие выключатели	34
5.4	Трансформаторы тока (ТТ)	35
5.5	Трансформаторы напряжения (ТН)	36
5.6	Разрядники	36
5.7	Кабельное соединение КРУЭ	37
5.8	Воздушные проходные изоляторы	38
5.9	Подсоединение к трансформаторам и реакторам	38
5.9.1	Прямое подсоединение через шинопровод с элегазовой изоляцией	38
5.9.2	Подсоединение через кабель	39
5.9.3	Подсоединение с короткими воздушными линиями	39
5.10	Соединительные элементы в КРУЭ	39
5.10.1	Компенсаторы	39
5.10.2	Соединительные элемент	39
5.10.3	X-, T-образные оболочки / оболочки углового типа	39
5.11	Паспортные таблички / маркировка	39
5.12	Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	40
<b>6</b>	<b>Вспомогательное оборудование</b>	<b>40</b>
6.1	Блокировка	41
6.2	Контроль газа	41
6.3	Контроль состояния КРУЭ	41
6.4	Специальные требования КРУЭ к системе защиты	42
6.5	Электромагнитная совместимость	43

<b>6.6</b>	<b>Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем</b>	<b>43</b>
6.6.1	Основные исходные данные пользователя	44
6.6.2	Основные исходные данные изготовителя	44
<b>7</b>	<b>Здание / строительные работы / стальные конструкции / заземление</b>	<b>44</b>
7.1	Здание и строительные работы	44
7.2	Опорные конструкции и доступность	47
7.3	Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	48
7.3.1	Основные исходные данные пользователя	48
7.3.2	Основные исходные данные пользователя	48
<b>8</b>	<b>Транспортировка и хранение</b>	<b>48</b>
8.1	Общая информация	48
8.2	Технический анализ	48
8.3	Страхование поставки, таможенные пошлины и расходы	49
8.4	Получение груза	50
8.5	Хранение	50
8.6	Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	50
8.6.1	Основные исходные данные пользователя	50
8.6.2	Основные исходные данные изготовителя	50
<b>9</b>	<b>Монтаж и ввод в эксплуатацию распределительных устройств</b>	<b>51</b>
9.1	Общая информация	51
9.2	Подготовка рабочей площадки	51
9.3	Подготовка рабочей бригады	51
9.4	Монтаж новых КРУЭ	52
9.5	Монтаж дополнительного оборудования КРУЭ	52
9.6	Ввод в эксплуатацию	53
9.6.1	Ввод в эксплуатацию основного оборудования	53
9.6.2	Ввод в эксплуатацию вспомогательного оборудования	53
9.6.3	Ввод в эксплуатацию элегазовой изоляционной среды	53
9.7	Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	54
9.7.1	Основные исходные данные пользователя	54
9.7.2	Основные исходные данные изготовителя	54
<b>10</b>	<b>Испытания</b>	<b>54</b>
10.1	Типовые испытания	56
10.2	Стандартные испытания	56
10.3	Испытания после монтажа на рабочей площадке	56
10.4	Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	57
10.4.1	Основные исходные данные пользователя	57
10.4.2	Основные исходные данные изготовителя	57

<b>11 Элегаз и процедуры обращения с ним</b>	<b>58</b>
11.1 Повторное использование элегаза	58
11.2 Обращение с продуктами разложения элегаза	59
11.3 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	60
11.3.1 Основные исходные данные пользователя	60
11.3.2 Основные исходные данные изготовителя	61
<b>12 Вопросы технического обслуживания</b>	<b>61</b>
12.1 Типы технического обслуживания	61
12.2 Методика технического обслуживания	62
12.3 Меры безопасности при эксплуатации и техническом обслуживании	63
12.3.1 Техника безопасности при эксплуатации и техническом обслуживании	63
12.3.3 Оборудование подстанции	69
12.4 Специальные вопросы ремонтного технического обслуживания после основного диэлектрического пробы	70
12.5 Основные исходные данные и дополнительные рекомендации	71
12.5.1 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	71
12.5.2 Дополнительные рекомендации для пользователя и изготовителя	72
<b>13 Обучение</b>	<b>73</b>
13.1 Общее обучение	74
13.2 Обучение для установки	74
13.3 Обучение эксплуатации и техническому обслуживанию	74
13.4 Специализированное обучение	75
13.5 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем	75
13.5.1 Основные исходные данные пользователя	75
13.5.2 Основные исходные данные изготовителя	76
<b>14 Новые разработки</b>	<b>76</b>
14.1 Оперативный контроль и диагностика	76
14.2 Нетрадиционные ТН и ТТ	78
14.3 Интеграция устройств защиты и управления в КРУЭ	80
<b>15 Приложения</b>	<b>80</b>
15.1 Приложение А – Проверки на рабочей площадке	80
15.2 Приложение В – Гексафторид серы (элегаз) в подстанциях – Заявление по охране окружающей среды [[11]]	82

## 0 Введение

Организация CIGRE WG 23-04 опубликовала основные правила проектирования наружных подстанций переменного тока [[1]]. Не считая некоторых небольших комментариев, содержание данного документа ограничено комплектными распределительными устройствами с воздушной изоляцией (КРУВ). В связи с этим все вопросы, которые относятся к подстанциям с элегазовой изоляцией (КРУЭ) на номинальные напряжения 72,5 кВ и выше или к подстанциям, отличающихся от КРУВ, отражены в данном новом руководстве по использованию.

В главах предыдущего руководства, относящихся к системным требованиям, анализу сери и потребностям подстанции, предоставлена информация по подстанциям с КРУВ и КРУЭ.

Другие разделы, затрагивающие такие вопросы, как критерии выбора наиболее подходящей площадки, требования к площади, факторы окружающей среды и компоновку подстанции, содержат специальную информацию, в связи с чем они представлены в данном руководстве.

Специальные требования к комплектным распределительным устройствам с элегазовой изоляцией представлены в документе **IEC 517** (Комплектные распределительные устройства в металлической оболочке на номинальные напряжения 72,5 кВ и выше). Для индивидуальных компонентов КРУЭ используются дополнительные стандарты МЭК:

IEC 44	Измерительные трансформаторы
IEC 56	Высоковольтные силовые выключатели переменного тока
IEC 71	Координация изоляции
IEC 99-4	Металл-оксидные разрядники для защиты от атмосферных перенапряжений без зазоров для систем переменного тока
IEC 129	Разъединители (устройства развязки) переменного тока и грозовые переключатели
IEC 137	Проходные изоляторы для напряжений переменного тока свыше 1000 В
IEC 185	Трансформаторы тока
IEC 186	Трансформаторы напряжения
IEC 265-2	Высоковольтные выключатели - Часть 2: на номинальное напряжение 52 кВ и выше
IEC 270	Измерения частичного разряда
IEC 376	Технические характеристики и приемка нового гексафторида серы
IEC 480	Руководство по проверке гексафторида серы (элегаза), отобранного из электрооборудования
IEC 694	Общие положения или нормы для высоковольтной коммутационной аппаратуры и механизмов управления
IEC 815	Руководство по выбору изоляторов с учетом вероятности загрязнения.
IEC 859	Кабельные соединения для комплектных распределительных устройств в металлической оболочке с элегазовой изоляцией на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше
IEC 1128	Разъединители переменного тока – Переключение тока, передаваемого по шине, при помощи разъединителей
IEC 1129	Заземлители цепи переменного тока – Коммутация индуцированных токов
IEC 1259	Комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией в металлической оболочке на напряжение 72,5 кВ и выше – Требования к коммутации зарядных токов, передаваемых по шине, при помощи разъединителей
IEC 1634	Высоковольтная коммутационная аппаратура и распределительные устройства – Использование и обращение с гексафторидом серы (элегазом) в высоковольтной коммутационной аппаратуре и распределительных устройствах
IEC 1639	Прямое соединение между КРУЭ и силовым трансформатором на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше

В дополнение к этим стандартам в различных странах существуют требования для оборудования, работающего под давлением. Перечень требований, относящихся к КРУЭ, см. в Разделе 10.

Многие из этих стандартов пересматриваются. Читатель должен использовать самые последние издания.

## **1 Выполнение проекта КРУЭ – планирование и технологический процесс**

### **1.1 Введение**

Данное руководство полезно начать с краткого описания планирования и технологического процесса проекта КРУЭ, дать читателю краткий обзор содержания руководства и помочь ориентироваться в тексте.

На блок-схеме Рис.1.1 представлены работы, выполняемые по типичному проекту КРУЭ. Показано, что процесс фактически начинается с сетевого планирования, выполняемого системными инженерами. В связи с этим важно, чтобы инженеры по системному планированию обладали определенным минимумом знаний по КРУЭ для того, чтобы использовать преимущества данной технологии. В данном руководстве содержатся основы «ноу-хау».

Установка подстанции КРУЭ представляет собой сложный проект, выполнение которого требует привлечения многих технических дисциплин.

Важно иметь в виду, что технологические процессы технических проектов по своей природе обладают обратной связью. Это означает, что на любой стадии процесса планирования может возникнуть новая информация, которая будет иметь последствия для всего проекта, и может привести к необходимости пересмотра или замены частей проекта.

Данное руководство предназначено для оказания помощи в решении технических вопросов, связанных с КРУЭ, а также предоставить информацию по успешному выполнению всех стадий проекта КРУЭ. В данном руководстве отсутствует экономическая или юридическая информация, относящаяся к таким проектам.

### **1.2 Начальный этап проекта**

На начальном этапе проекта определяется потребность в одной или нескольких коммутационных функциях в сети. Для удовлетворения увеличенной потребности в большем количестве электроэнергии для общего или промышленного электроснабжения или для доступности системы в определенном районе необходимы повышенная генерация электроэнергии и/или более высокая мощность трансформаторов. В обоих случаях решение будет включать в себя потребность в новых коммутационных функциях либо в форме нового комплектного распределительного устройства для электростанции, новой подстанции или установки дополнительного оборудования для ранее установленного комплектного распределительного устройства, которое может быть либо типа КРУВ, либо КРУЭ.

Необходимость в новых коммутационных функциях может также возникнуть на основе других потребностей, связанных с работой сети, например, установка элемента с реактивным сопротивлением или конденсаторной батареи и т.п.

Важным параметром будет возможное размещение подстанции. В связи с этим должны быть рассчитаны бюджетные расходы на проект, включая расходы на площадку, на строительство здания, стоимость различных технических решений для соединительных линий и т.п.

Очевидно, что потребность в коммутационных функциях и, следовательно, возможно в элегазовой подстанции появится в первую очередь во время «стадии планирования сети».

В любом случае за эту стадию отвечают системные инженеры. Их задачей должно быть представление необходимости коммутационных функций и номинальных параметров инженерам, отвечающим за планирование и строительство подстанций.

Вместе с представлением таких потребностей должна быть подготовлена однолинейная диаграмма, показывающая основные необходимые функции и требуемые номинальные параметры. В брошюре CIGRE «Основные правила проектирования наружных подстанций переменного тока» [[1]] можно найти большое количество полезной информации, связанной с общим планированием подстанций.

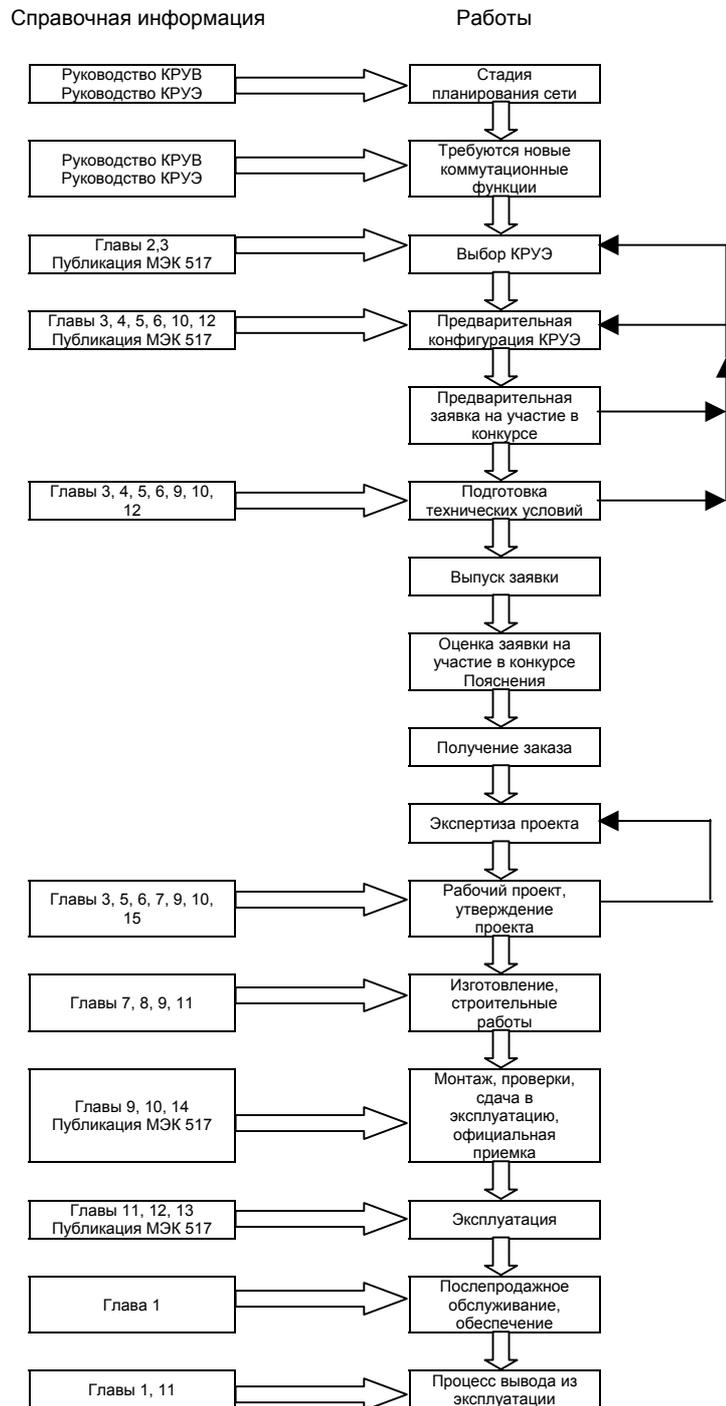


Рис.1.1. Блок-схема выполнения проекта КРУЭ

### **1.3 Выбор между КРУВ, КРУЭ и комбинированными установками**

При принятии решения о планировании подстанции или по крайней мере о проведении исследований для нее важным является вопрос о том, какую технологию использовать. Могут быть различные аргументы как «за», так и «против» различных возможностей. См.: Гл. 2 и 3

Представленная информация может оказаться полезной для выполнения анализа стоимости срока службы для различных вариантов. Возможно, что это даст новое понимание проблемы.

См.: Гл. 2

Когда принято решение о создании подстанции КРУЭ, необходимо решить вопрос об организации проекта. Это зависит от того, имеет ли пользователь в своей собственной структуре опытный технический персонал. При его отсутствии необходимо привлечение консалтинговой компании или заключение контракта на установку «под ключ» напрямую с изготовителем КРУЭ или через компанию-подрядчика.

### **1.4 Определение предварительной конфигурации КРУЭ**

Первым исследованием, которое должно быть выполнено, является подробный анализ более определенной однолинейной схемы. Оно должно включать в себя специальные требования, связанные с технологией КРУЭ, например, использование заземлителей, измерительных трансформаторов, разрядников для защиты от атмосферных перенапряжений и т.п.

На основе этой однолинейной диаграммы будет возможно разработать эскизы различных имеющихся конструкций и компоновок КРУЭ и посмотреть, каким образом они могут быть использованы в данном проекте с учетом рабочей площадки и требований к строительству (например, внутренняя, наружная или комбинированная установка).

В это время является нормальным и полезным связаться с изготовителем для проведения обсуждений до подачи заявки на участие в конкурсе и получить предварительные технические предложения со сметами расходов. Тем не менее, на этой стадии необходимо иметь в виду, что основной план размещения возможно не будет разработан под конкретного изготовителя.

Завершенные и продолжающиеся контракты с несколькими изготовителями также предоставят надежную информацию об опыте и проектных концепциях каждого из них.

Важным элементом является анализ связи КРУЭ и других компонентов сети, таких как воздушные линии передачи, трансформаторы, кабели и т.п.

Эти соединения окажут основное влияние на общий план размещения оборудования.

Однолинейная схема, проект основных технических данных и проект плана размещения оборудования представляют собой основную информацию для составления в будущем заявки на участие в конкурсе.

В главах 3, 4, 5, 6, 10 и 12 предоставлена основная информация по планированию и определению основных данных и конфигурации. Дополнительную информацию можно найти в публикации МЭК № 517, и главах 9 и 10.

### **1.5 Другие исследования**

После того, как будет определена предварительная конфигурация и основные данные, необходимо провести другие исследования. Они должны включать в себя следующее:

- исследования перенапряжений и координации изоляции.  
см.: Гл. 4
- вспомогательное оборудование, такое как оборудование для управления, защиты, диагностики и контроля.  
см.: Гл. 6
- электромагнитная совместимость  
см. : Гл. 6
- заземление КРУЭ и вспомогательного оборудования  
см. : Гл. 6, 7 и [[2]]
- вопросы строительства  
см.: Гл. 7
- средства транспортировки, хранения и монтажа  
см.: Гл. 8 и 9
- требования, предъявляемые техническим обслуживанием КРУЭ и возможными установками дополнительного оборудования в будущем  
см. : Гл. 12
- обеспечение качества, процедуры проверок во время технического обслуживания и особенно проверки на рабочей площадке  
см.: Гл. 10

## **1.6 Подготовка заявки на участие в конкурсе**

После того как будут выполнены все необходимые предварительные исследования и предварительная подготовка заявки для участия в конкурсе и все основные данные будут убедительными, вся полученная информация будет формировать основу технической части заявки на участие в конкурсе.

Фактически комбинация параграфов, озаглавленных «Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителями», из соответствующих подразделов может в большой степени обеспечить «технические параметры» для заявки.

При отправке окончательной заявки должна быть определена вся информация для подготовки предложения с твердой ценой. Данная цель достигается при помощи проведения достаточного объема предварительных исследований, включая предварительную заявку на участие в конкурсе, если сделан вывод о ее необходимости. Изготовителям должна быть предоставлена возможность выдать различные предложения по схеме размещения оборудования (см. раздел 1.4).

## **1.7 Оценка конкурсных заявок, переговоры между пользователем и изготовителем**

Эта фаза может быть наиболее важной в проекте КРУЭ. Участвующие в конкурсе изготовители должны теперь представить их предложения о том, каким образом будут выполнены требования, заданные пользователем, и они должны указать для своих предложений фиксированную цену.

С учетом характера КРУЭ должны быть проведены подробные переговоры между пользователем и ответственными изготовителями с той целью, чтобы каждый изготовитель полностью понимал требования пользователя, а пользователь был удовлетворен тем, как изготовитель полностью выполняет его требования. Когда на этом этапе обе стороны полностью поймут друг друга, для успешного выполнения проекта будут обеспечены наилучшие возможности.

В конце таких переговоров и окончательных оценок пользователь должен пригласить выбранных изготовителей для проведения окончательных переговоров по контракту, заканчивающихся его подписанием. Эти переговоры также должны включать в себя обсуждение планов-графиков работ и информации, необходимой для координации

работ вплоть до ввода подстанции в эксплуатацию.

### **1.8 Рабочий проект и утверждение проекта**

После того как заказ будет размещен и будут выполнены другие возможные условия, изготовитель начинает разработку рабочего проекта установки.

Перед началом этих работ две стороны должны совместно выполнить «экспертизу проекта» для обеспечения того, что рассмотрены и учтены все позиции в соответствии с исходными пожеланиями.

Окончательный проект должен быть утвержден пользователем. Пользователь должен обеспечить последовательность всех соглашений, достигнутых ранее и во время переговоров по контракту.

Для того чтобы исключить задержку выполнения проекта, важно установить эффективные общепринятые процедуры утверждения, включая твердые сроки подготовки и утверждения информации, относящейся к той, которая принимается пользователем.

В тех случаях, когда используются несколько подрядчиков, важно определить обязанности по взаимодействию и обеспечить их согласование и подтверждение изготовителем КРУЭ, например, строительные работы, трансформаторы, кабели и т.п. См.: Гл. 3, 5, 6 и 7.

Проектные работы, относящиеся к размещению оборудования и системам заземления, должны быть завершены до начала строительных работ.

### **1.9 Период изготовления**

Во время периода изготовления большой объем работ проводится параллельно. В то время как КРУЭ изготавливается в цехах, строительные работы выполняются на рабочей площадке, а субподрядчики изготавливают свои детали.

Все это время проверки и испытания различных деталей проводятся для КРУЭ на заводе-изготовителе в соответствии с планом обеспечения качества (например, серии ISO 9000), который должен быть согласован с пользователем.

Условием выполнения проекта КРУЭ в соответствии с планом является жесткий и взаимно согласованный план-график, охватывающий всю информацию, которая должна быть подготовлена изготовителем, и утвержденный пользователем.

См.: Гл. 7, 8, 9 и 11.

### **1.10 Монтаж, проверки на рабочей площадке, ввод в эксплуатацию и официальная приемка**

Во время монтажа КРУЭ используются специальные условия. Все строительные работы должны быть выполнены перед началом монтажа.

Для выполнения монтажных работ требуется специальная квалификация и они предпочтительно должны быть выполнены изготовителем. По меньшей мере изготовитель должен контролировать эти работы и обеспечить, чтобы преобладали соответствующие характеристики рабочей площадки.

См.: Гл. 9

Проверки на рабочей площадке и ввод в эксплуатацию должны проводиться в соответствии с согласованными процедурами испытаний.

См.: Гл. 9 и 10.

После официальной приемки пользователь принимает на себя официальную ответственность за установку. К этому времени, как самое позднее, должна быть подготовлена документация и передана пользователю.

См.: Гл. 12.

### **1.11 Обучение обслуживающего персонала**

До ввода в эксплуатацию и официальной приемки соответствующий персонал пользователя должен быть обучен изготовителем эксплуатации и техническому обслуживанию оборудования КРУЭ.

Если это возможно, то основной персонал может получить дополнительное обучение во время его участия в заводской сборке и испытаниях, а также в монтаже и проверках на рабочей площадке.

См.: Гл. 13

### **1.12 Вопросы эксплуатации и послепродажное обслуживание**

После официальной приемки за эксплуатацию установки КРУЭ отвечает пользователь. Вопросы эксплуатации и технического обслуживания рассмотрены в главе 13.

Важным вопросом, который должен быть согласован во время переговоров по контракту, является «послепродажное обслуживание». Сюда входят такие аспекты, как техническая поддержка, обслуживание при кратком уведомлении, поставка запасных частей, срок службы и т.п.

См.: Гл. 12 и 13

### **1.13 Процесс вывода из эксплуатации**

Другим вопросом, который должен быть рассмотрен во время планирования и заключения контракта, является «вывод КРУЭ из эксплуатации», т.е. каким образом обращаться с ним при выводе его из эксплуатации».

Важно знать вопросы, связанные с охраной окружающей среды, для материалов, используемых в КРУЭ, т.е. обращение с материалами и газом и их очистка, а также возможность их повторного использования.

Для оценки этих вопросов будет полезно иметь подробные перечни используемых материалов. Процесс вывода из эксплуатации не охватывается полностью данным руководством, тем не менее, в качестве первого шага в главе 11 предоставлена информация по обращению с элегазом и его повторному использованию, что является наиболее важной проблемой.

## **2 Критерии выбора КРУЭ**

Традиционно пользователи должны стремиться к выдаче технических условий на КРУВ и быть уверенными в том, что они будут также пригодны и для КРУЭ. Это не может быть обеспечено каждый раз и технические условия пользователей должны быть более определенными для обеспечения варианта «наилучшей ячейки».

Первоначальная стоимость оборудования КРУЭ обычно выше стоимости КРУВ. Следовательно, для объяснения более высоких первоначальных расходов на оборудование необходимо рассмотреть много других критериев и преимуществ. Основными преимуществами применения КРУЭ является герметизация и компактность, которые определяют другие преимущества. Для определенных приложений преимущества КРУЭ являются ключевым фактором, который делает КРУЭ единственным возможным техническим решением. Ниже описаны обычные критерии, которые необходимо учитывать.

### **2.1 Преимущества КРУЭ**

Основным преимуществом КРУЭ является его компактность, что напрямую влияет на требования к площади размещения, стоимости территории, визуальное воздействие и возможные технические приложения. Компактные размеры обеспечивают большое разнообразие конструкций, которые в свою очередь обеспечивают внутреннюю, наружную, подземную, комбинированную и контейнерную установку (даже для

временной эксплуатации). Модульная конструкция КРУЭ в связи с ее компактностью обеспечивает выполнение специальных требований к рабочей площадке в большей степени, чем это возможно для КРУВ.

Площадь территории, требуемая для подстанции КРУЭ, находится в диапазоне приблизительно от 10 до 20% от площади, требуемой для подстанции КРУВ с учетом только коммутационной аппаратуры. Экономия общей площади территории зависит существенно от конкретного уровня напряжения и от соединения с трансформаторами, реакторами и входящими/исходящими линиями. Максимальная экономия достигается при помощи кабельных соединений и коротких кабельных каналов КРУЭ. Если подстанция соединяется с воздушными линиями электропередачи, тогда для мачт и боковых жил потребуются дополнительное пространство, что может снизить общую экономию территории. На Рис. 2.1. показано КРУЭ с обоими типами соединений. На левой стороне фотографии КРУЭ подсоединяется к ВЛП (воздушной линии передачи); на правой стороны оно подсоединено к кабелю.



Рис. 2.1: Наружная подстанция КРУЭ на 245 кВ с воздушной линией передачи и кабельными соединениями

В большинстве случаев компактность и уменьшенная площадь обеспечивают оптимальный выбор новых запланированных подстанций на основе требований к сети. Для внутренней или подземной КРУЭ это возможно даже в городских зонах или районах с высокой плотностью населения. Достаточно часто это обеспечивает строительство подстанции в месте потребления электроэнергии, что приводит к значительному снижению себестоимости распределительной сети.

В случае гидроэлектростанций, КРУЭ может быть смонтировано рядом с турбинами и генераторами, что обеспечивает значительную экономию кабельной сети или шинопроводов. Оно даже обеспечивает оптимизацию расхода воды с преимуществами по стоимости строительных работ. Возможность монтажа подстанции как можно ближе к повышающим трансформаторам повышает надежность всей электростанции.

КРУЭ с более высокими номинальными параметрами может использоваться для замены КРУВ в случае возрастающих потребностей в электроэнергии или более высокого напряжения передачи электроэнергии без требования дополнительных площадей для размещения оборудования. То же самое относится к тому случаю, когда возникает необходимость расширения существующей КРУВ. Пример замены КРУВ на КРУЭ показан на Рис. 2.2.

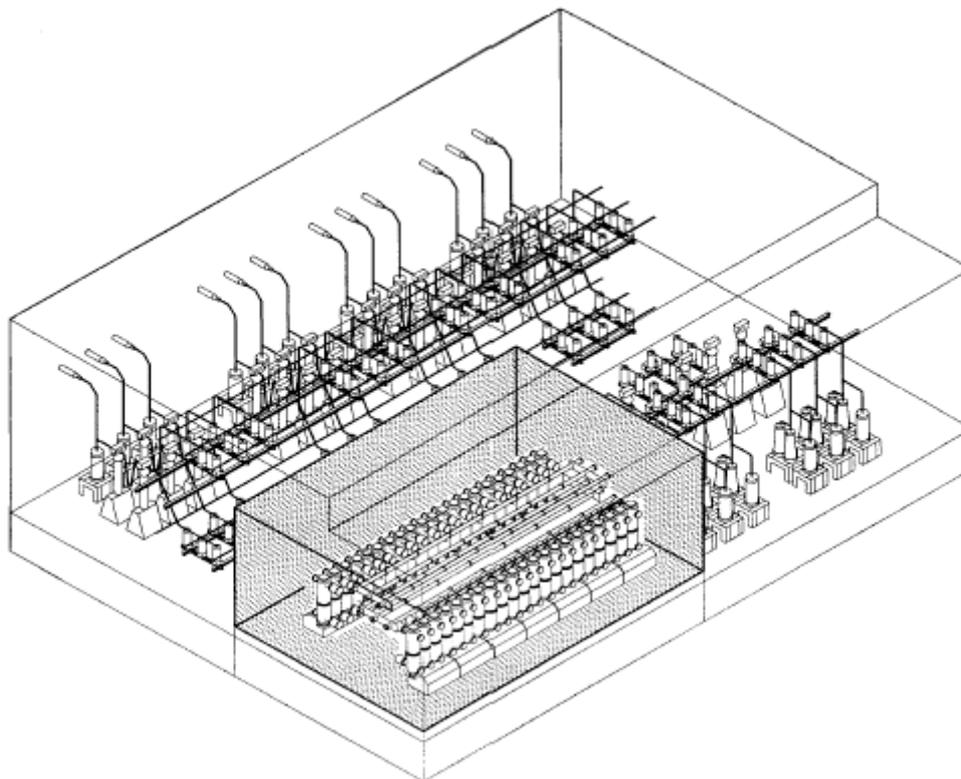


Рис. 2.2: Замена подстанции КРУВ с 8 ячейками (150 кВ) на подстанцию КРУЭ с 14 ячейками

### 2.1.1 Влияние окружающих условий на коммутационную аппаратуру

В тех случаях, когда условия воздействия окружающей среды могут быть достаточно жесткими, например, на прибрежной рабочей площадке, где возможны сильные солевые отложения, или в промышленных районах, где возможны другие значительные загрязнения, может потребоваться очистка изоляторов с достаточно регулярными интервалами, возможно каждый год. Аналогичным образом может быть сильная коррозия металлических компонентов, фланцев, электрических соединений и т.п. Учет таких условий может привести к очень высокой стоимости технического обслуживания КРУВ, в то время как КРУЭ, размещенное в здании, будет защищено от такого воздействия, за исключением элегазовых/воздушных проходных изоляторов. Следовательно, использование КРУЭ часто может быть оправдано только на одном этом основании.

Аналогичным образом, в том случае, когда подстанция должна быть установлена на очень большой высоте, влияние атмосферного давления нужно учитывать только для проходных изоляторов установки КРУЭ (в то время как для КРУВ учет этого фактора может потребовать обеспечения дополнительной дорогостоящей изоляции).

В случае предельно низких температур, снега или льда дополнительные меры снова должны рассматриваться только на проходных изоляторах и частях КРУЭ, размещаемых вне здания.

Учет сейсмичности может потребовать обеспечения существенной механической опоры и придания жесткости КРУВ для того, чтобы выполнить специфические

требования. Конструкция КРУЭ обеспечивает более простое выполнение требований сейсмических критериев при более низких общих затратах. Такие соображения в дальнейшем могут привести к комбинированному устройству КРУЭ/КРУВ, в котором выключатели, размыкатели, ТТ и ТН могут быть размещены в металлических оболочках для цепи с концевыми проходными изоляторами, соединяющимися с выходящими воздушными линиями передачи, и подвесным расположением шин.

### 2.1.2 Влияние коммутационной аппаратуры на окружающую среду

С учетом более низкой потребности КРУЭ к занимаемому пространству в сравнении с КРУВ влияние на окружающую среду минимизировано (например, вырубка лесов или строительные работы в горных районах). Визуальное воздействие КРУВ и связанных с ним воздушных линий передачи может быть неприемлемо в районах исключительной природной или архитектурной красоты и в центре города. Компактность КРУЭ позволяет (относительно несложным образом) скрыть подстанцию от взгляда общественности. Два примера показаны на Рис. 2.3 и Рис. 2.4.



Рис. 2.3: КРУЭ на 245 кВ с трансформаторами и с оборудованием на среднее напряжение 24 кВ, скрытое в здании, стилизованном под жилой дом (слева)

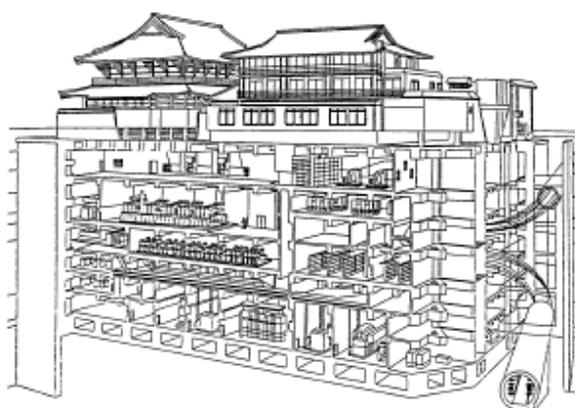


Рис. 2.4: Подземная подстанция с КРУЭ на 300 кВ и 92 кВ

Излучение шума от подстанции также может быть значительным, особенно в тех случаях, когда подстанция расположена близко к жилым кварталам. Шум, излучаемый при эксплуатации подстанции КРУЭ, в частности, если это не внутренняя установка, вероятно будет существенно ниже, чем шум, излучаемый эквивалентной подстанцией КРУВ. Излучение электромагнитных полей также может быть значительно ниже, чем в случае КРУВ, в зависимости от конструкции и системы заземления.

## 2.2 Обеспечение качества и надежность

Большинство изготовителей установили у себя систему управления качеством в соответствии с международными стандартами. Стандарт высокого качества обеспечивается тем, что все оборудование изготавливается, испытывается на заводе и проверяется на рабочей площадке одним изготовителем. Части/отсеки КРУЭ предварительно собираются на заводе до наиболее возможно высокого уровня комплектности (ограниченного только требованиями к транспортировке и погрузочно-разгрузочным операциям). Транспортировочные блоки в сборе проходят стандартные испытания, которые обеспечивают максимальное качество. Кроме того, сокращаются этапы сборки и время монтажа.

В случае интегрированных или предварительно изготовленных управляющих панелей и кабельной обвязки все цепи и функции могут быть проверены на заводе, что значительно снижает возможность отказа на рабочей площадке и время ввода в эксплуатацию.

**Частота отказов  
(количество отказов на отсек СВ в год)**

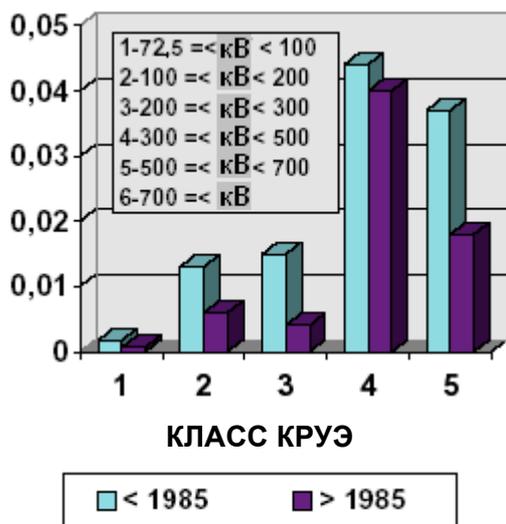


Рис.2.5: Частота основных отказов в зависимости от класса напряжения

В дополнение к этому окончательным этапом контроля качества являются проверки всей сборки КРУЭ, выполняемые на рабочей площадке, которые включают в себя испытания надежности изоляции на пробы, которые не применяются для КРУВ.

Уменьшение частоты отказов КРУЭ уже подтверждено более высокими показателями надежности. Анкеты, распространенные среди пользователей, показали, что КРУЭ, введенные до настоящего времени в эксплуатацию, работают удовлетворительно [[3], [4]]. Частота отказов в зависимости от класса напряжения КРУЭ, введенных в эксплуатацию до и после 1985 г., полученная из этих анкет, приведена на Рис. 2.5. Надежность расширяет рекомендуемые интервалы проведения технического обслуживания и обеспечивает снижение стоимости срока службы. Даже в том случае, если коэффициент готовности может быть снижен из-за более длительного времени простоев в случае неисправностей, надежность КРУЭ является очень высокой. Дополнительную информацию по частоте отказов КРУЭ см. [[3], [4]].

## 2.3 Безопасность

Герметизация КРУЭ обеспечивает высокую степень безопасности для операторов и другого персонала вследствие того, что невозможно случайно прикоснуться к какой-либо части коммутационной аппаратуры, находящейся под напряжением, т.е. без использования инструментов или чрезмерного усилия. Также предусмотрена защита от проникновения животных или актов вандализма.

Последствия внутренней дуги обычно локализуются внутри оболочки за счет быстрого срабатывания защиты. Даже в наихудших условиях это ограничивается срабатыванием устройства сброса давления или сквозным прогаром после определенного времени. Никакая часть КРУЭ не взрывается и поврежденная зона ограничивается газовым отсеком.

## 2.4 Стоимость срока службы

Можно ожидать, что современные КРУЭ будут удовлетворительно работать в течение многих лет с минимальным техническим обслуживанием или даже без него. Это особенно касается внутренних КРУЭ, когда исключено ухудшение характеристик вследствие воздействия погодных условий. За исключением тех случаев, когда КРУЭ работает в регулярном и тяжелом режиме, маловероятно, чтобы потребовалось техническое обслуживание выключателей, разъединителей и заземлителей в течение многих лет, и разумеется, при использовании КРУЭ мы постепенно приближаемся к концепции необслуживаемого использования («вставил и забыл»). Подход с учетом стоимости срока службы является существенным, когда сравниваются эквивалентные установки КРУВ или КРУЭ, и вполне возможно, что только один этот аспект может

оправдать начальную стоимость оборудования КРУЭ на стадии установки. Дополнительную информацию можно найти в [[5], [6]].

## 2.5 Заключение

Описанные оценки должны быть сделаны пользователем перед тем, как он выпустит свои технические условия для заявки, в которых должно быть четко указано его требование по использованию КРУВ или КРУЭ. Данная оценка должна быть выполнена в виде технико-экономического анализа. Экономическая часть может вызвать затруднения, поскольку пользователь часто не может получить реальную сметную стоимость на размещение оборудования на стадии проектирования. Изготовители часто неохотно назначают реальную сметную стоимость вследствие неадекватности информации, имеющейся на данном этапе работ и с учетом их потенциальных конкурентов. Тем не менее, на данном этапе пользователи и изготовители в дальнейшем должны сотрудничать более тесно в данной части процесса принятия решений.

## 3 Конфигурация КРУЭ

Соображения системного проектирования диктуют требования к основной конфигурации подстанции, а также к ее размещению в системе [[1]]. Следовательно, они также включают в себя основной выбор между КРУЭ и КРУВ (см. главу 2). После принятия решения об использовании системы с элегазовой изоляцией необходимо рассмотреть конструкцию КРУЭ в соответствии с описанием, представленным в следующих главах.

### 3.1 Выбор типа КРУЭ

После принятия решения по использованию КРУЭ пользователь сталкивается с вопросом выбора типа КРУЭ. Следующая основная классификация зависит от типа конструкции, от условий эксплуатации и от объема частей с элегазовой изоляцией:

Тип конструкции

- КРУЭ для новой подстанции
- КРУЭ для реконструкции или расширения существующего КРУЭ
- КРУЭ для реконструкции или расширения существующего КРУВ

Объем частей с элегазовой изоляцией:

- полностью герметизированная установка КРУЭ
- комбинированная установка

Условия эксплуатации:

- внутренняя КРУЭ
- наружная КРУЭ
- специальные приложения

#### 3.1.1 Тип конструкции

На ранней стадии проектирования подстанции системные требования определяют основной тип конструкции, т.е. будет ли это новая конструкция или реконструкция существующего КРУЭ или КРУВ. Тип конструкции вместе с местом и характером площадки для установки влияют на основную конфигурацию (объем частей с элегазовой изоляцией) и на те условия эксплуатации, которым должно соответствовать КРУЭ (см. Гл. 3.1.3). Возможно расширение существующего КРУЭ. Тем не менее, в некоторых случаях для конструкций различных изготовителей и/или различных поколений КРУЭ требуются специальные интерфейсы. Примеры этого показаны на Рис. 3.1 и 3.2.



Рис. 3.1: Расширение КРУЭ одинарной системой шин

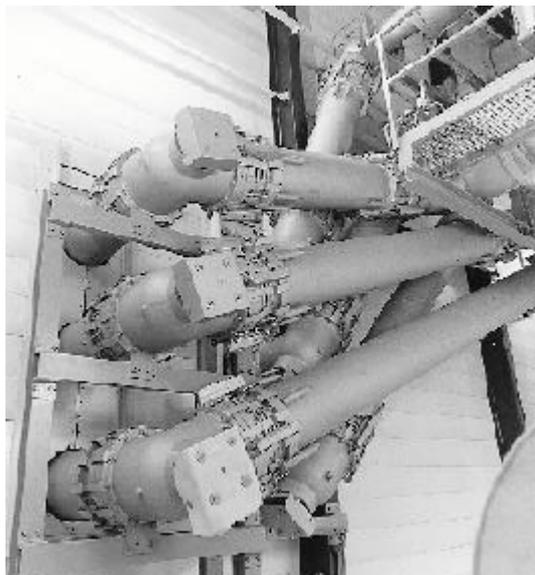


Рис. 3.2: Расширение КРУЭ двойной системой шин



Рис. 3.3: Внутренняя подстанция КРУЭ на 420 кВ

### 3.1.2 Объем деталей с элегазовой изоляцией

#### 3.1.2.1 Полностью герметизированные установки КРУЭ

Полностью герметизированные установки КРУЭ включают в себя только компоненты с элегазовой изоляцией в металлической оболочке в их первичных цепях. Из-за величины капиталовложений или по техническим причинам (см. главу 5) некоторые компоненты могут быть исключением из этого правила, например, разрядники для защиты от атмосферных перенапряжений, трансформаторы напряжения или оборудование для высоковольтного – высокочастотного соединения (ВВ-ВЧ) на выходящих линиях.

Полностью герметизированное КРУЭ может быть спроектировано для внутреннего использования (Рис. 3.3). Оно также может использоваться в качестве варианта наружного размещения (Рис. 2.1). Для этих типов все ключевые преимущества КРУЭ, описанные в главе 2 могут быть полностью использованы.

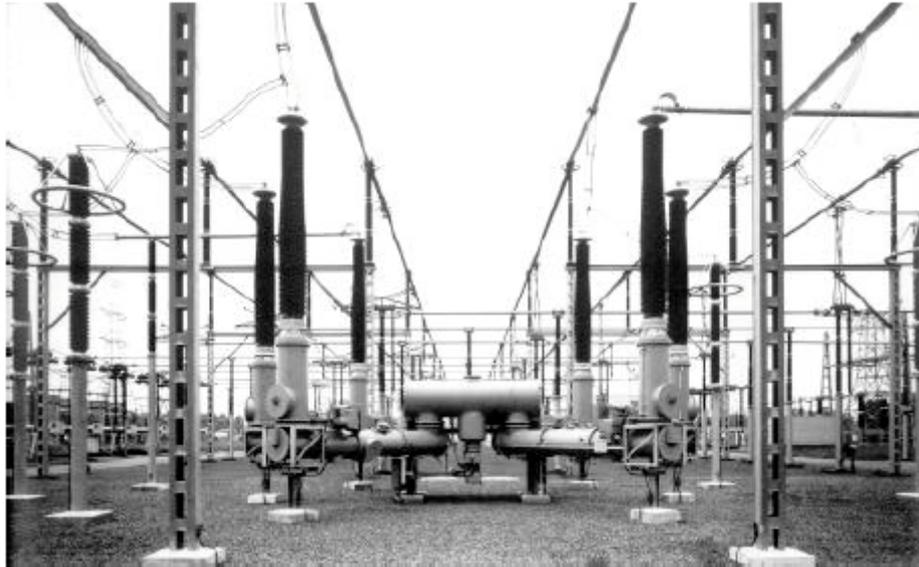


Рис. 3.4: Комбинированная установка на 420 кВ с КРУЭ и шиной с воздушной изоляцией

### 3.1.2.2 Комбинированные установки

Комбинированные установки представляют комбинацию компонентов КРУЭ и КРУВ. Можно описать две различные основные концепции:

- комбинация компонентов КРУЭ и КРУВ, установленных одновременно в общей конфигурации (так называемая «классическая» комбинация)

или:

- комбинация более или менее разделенных и полных частей КРУЭ и КРУВ, взаимно соединенных.

Первый вариант обычно представлен следующими двумя альтернативными комбинациями:

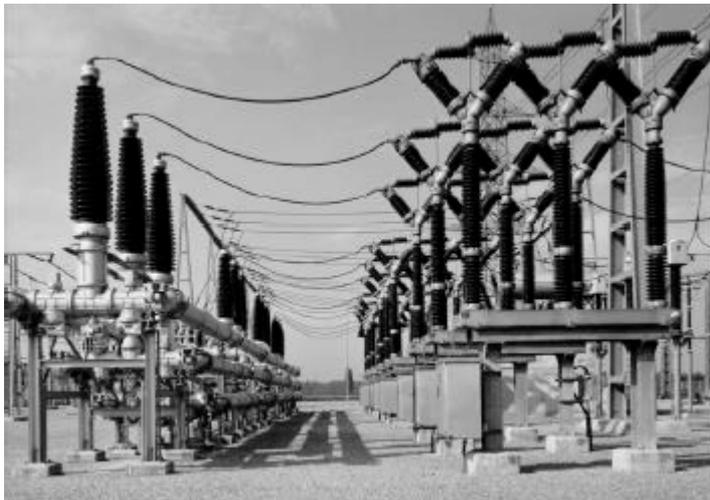


Рис. 3.5: Комбинированная установка на 170 кВ с КРУВ и шиной/шинным разъединителем с элегазовой изоляцией

- Комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией с обычными шинами и/или шинными разъединителями с воздушной изоляцией (Рис. 3.4),
- Шины с элегазовой изоляцией с обычной коммутационной аппаратурой с воздушной изоляцией (Рис. 3.5).

Возможны другие комбинации. «Классические» комбинированные конструкции обычно используются в таких установках, где имеются более строгие требования по быстрой или простой изоляции отсека в случае серьезной неисправности и для восстановления части, остающейся в эксплуатации, или в таких установках, в которых

необходимо соединять отсеки КРУЭ, которые размещены на достаточно большом расстоянии друг от друга и где межсоединение шинпровода с элегазовой изоляцией становится более дорогим по сравнению с конструкцией с воздушной изоляцией (например, повышающие подстанции электростанции). Они также могут оказать эффективную помощь, если необходимо заменить исходную однолинейную схему во время реконструкции КРУВ в результате сокращения занимаемого пространства.

Второй случай обычно представлен использованием только шинпровода с элегазовой изоляцией для соединения между двумя частями КРУВ или соединения части КРУВ с полностью герметизированной частью КРУВ.

В общем, для комбинированных установок (конкретно «классического» типа) требуются наружные или контейнерные компоненты КРУЭ, и они могут быть использованы для новых конструкций, а также (предпочтительно) для расширения, реконструкции, модификации или модернизации существующих подстанций.

### **3.1.3 Условия эксплуатации**

#### **3.1.3.1 Внутренняя установка**

КРУЭ, предназначенные для условий эксплуатации внутри помещения, определены как КРУЭ внутренней установки. Основным преимуществом КРУЭ внутренней установки является то, что оно, за исключением проходных изоляторов элегаз/воздух или шинпроводов наружных соединений, является полностью независимым от наружных окружающих условий, а также то, что его влияние на окружающую среду минимизировано. Оно может быть установлено в новом здании, в существующем здании, в подземной полости, в дамбе или в простом холле. Основным преимуществом является независимость внутреннего КРУЭ от погодных условий во время выполнения работ по техническому обслуживанию. Недостатком является дополнительная стоимость строительных работ. В связи с этим КРУЭ внутренней установки необходимо в следующих случаях:

- городские районы, места с природной красотой или сложной топографией, или в других подстанциях, которые должны вписываться в ландшафт;
- загрязненные или прибрежные зоны, либо зоны с большой высотой над уровнем моря, либо суровые/экстремальные климатические условия (которые могут привести к дополнительным мерам по конструкции здания);
- стратегические размещения.

#### **3.1.3.2 Наружная установка**

КРУЭ, предназначенные для наружной эксплуатации, определены как КРУЭ наружной установки. В очень жарких или холодных окружающих условиях размер и стоимость КРУЭ наружной установки может превышать аналогичные параметры для КРУЭ внутренней установки. Но в целом вследствие очень простых строительных работ общая стоимость КРУЭ наружной установки составляет примерно 90 % стоимости КРУЭ внутренней установки [[4]]. Стоимость технического обслуживания оборудования КРУЭ наружной установки немного выше по сравнению с КРУЭ внутренней установки, но это может быть компенсировано отсутствием необходимости технического обслуживания здания. Конструкция для наружной установки обеспечивает создание гибридных установок для новых подстанций, а также для расширения и модернизации существующих КРУВ. В большинстве случаев это является фактором, который определяет необходимость использования КРУЭ наружной установки [[3]].

При выборе материалов должны быть учтены специальные соображения [[5]] (возможность долговременной стойкости, защита от коррозии и воздействия атмосферных условий для металлических деталей, уплотнения для элегаза, соединения, механизмы и их корпуса, платы управления, кабели и устройства контроля элегаза). Также должны быть приняты меры для обеспечения безотказной работы при низких температурах.

### 3.1.3.3 Специальные применения

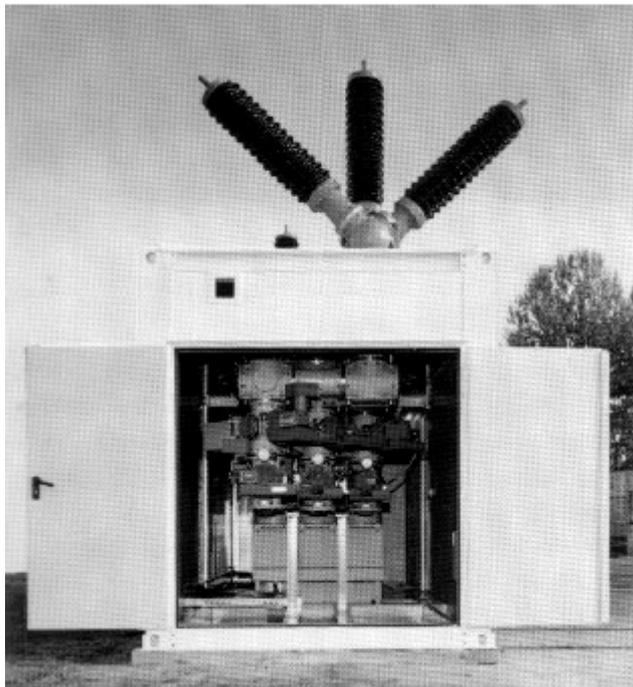


Рис. 3.6: Контейнерное КРУЭ на 145 кВ

**Контейнерное**  
 В контейнерном КРУЭ, показанном на Рис. 3.6, стандартный металлический контейнер содержит все активные компоненты одного или двух герметизированных отсеков с выключателями, блок управления, тепловую изоляцию, освещение, кондиционирование воздуха, вентиляцию и смотровые люки, и полностью испытывается на заводе перед поставкой. Обычно контейнерные КРУЭ в стандартном контейнере ISO применяются для более низкого номинального напряжения. Применяя контейнерный тип КРУЭ возможно использовать преимущества КРУЭ как внутренней, так и наружной установки. Эта конструкция пригодна для комбинированных установок для временной или постоянной эксплуатации и для КРУЭ меньшего размера.

При постоянной эксплуатации блок контейнерного КРУЭ устанавливается на рабочей площадке на простом бетонном фундаменте. Эти блоки также можно соединить последовательно. Время строительства и монтажа для таких установок очень короткое. Минимальный объем работ на площадке сохраняет эффективность заводского контроля качества и результаты по надежности эксплуатации.

#### Мобильное

При временной эксплуатации простой отсек КРУЭ может быть установлен на трейлере, как это показано на Рис. 3.7, и временно эксплуатироваться, в то время как существующие части подстанции по каким-либо причинам должны быть обесточены. Таким образом электропитание реконструируемого отсека КРУЭ может быть осуществлено через временный отсек КРУЭ и не будет прерываться.

#### Панельное

В панельном КРУЭ все активные компоненты отсека размещены в одной или нескольких панелях прямоугольной формы с низким избыточным давлением элегаза. Панельное КРУЭ обладает всеми основными преимуществами КРУЭ, описанными в главе 2 без недостатков, связанных с отсеками под давлением.



Рис. 3.7: Мобильное КРУЭ на 132 кВ

Панельные КРУЭ обычно имеются в диапазоне напряжений от 45 до 72,5 кВ. В сравнении с оборудованием подстанции с воздушной изоляцией в этом диапазоне

напряжений панельные КРУЭ обладают компактной формой, меньше влияют на окружающую среду и просты в эксплуатации и техническом обслуживании. Для более высокого напряжения нормальное КРУЭ обычно является более экономичным техническим решением.

### 3.2 Конструкция однолинейной схемы

Основные аспекты, которые влияют на выбор однолинейной схемы КРУЭ, т.е. схемы с шинопроводом, устройство коммутационной аппаратуры и используемые индивидуальные компоненты обычно пригодны для КРУЭ, а также для КРУВ, и подробно описаны в главе 2 документа [[1]]:

- a) эксплуатационная гибкость (влияние системных требований и/или неисправностей на работу подстанции),
- b) надежность системы (влияние требований к техническому обслуживанию подстанции и/или неисправностей и их устранения на работу системы, стратегическая важность подстанции),
- c) наличие (ожидаемые плановые и внеплановые простои индивидуальных компонентов подстанции и их влияние на объем подстанции, который должен быть обесточен, влияние дальнейшего расширения подстанции),
- d) управление подстанцией (простые и эффективные рабочие параметры режимов эксплуатации),
- e) безопасность подстанции (влияние основного и вспомогательного оборудования на систему защиты подстанции),
- f) затраты (оптимизированные в технических/экономических терминах),
- g) другие соображения, такие как:
  - будущее развитие системы энергоснабжения
  - упрощение будущих расширений
  - национальные правила и политика стандартизации пользователя
  - уровень квалификации и опыта обслуживающего персонала.

Как уже было сказано выше, основные правила являются теми же самыми как для КРУЭ, так и для КРУВ. Тем не менее, поскольку КРУЭ, с одной стороны, имеет очевидные технические преимущества, а, с другой стороны, устройство КРУЭ увеличивает стоимость оборудования, то если просто перенять схемы от КРУВ, то такое решение обычно бывает неэффективным. В общем случае должны быть рассмотрены следующие специальные особенности КРУЭ и их последствия:

- более высокая надежность и коэффициент использования КРУЭ (низкая частота отказов и длинные интервалы технического обслуживания)  
Менее строгие требования по резервированию КРУЭ приемлемы в высоковольтных цепях, т.е. более простых однолинейных схемах КРУЭ. Эти схемы могут иметь меньшее количество шинопроводов и коммутационных устройств, а установка обходных шин в целях технического обслуживания в большинстве случаев представляется ненужной [[3], [4], [7]].
- более простые пересечения в КРУЭ.  
Гибкость устройства КРУЭ позволяет, например, обеспечивать пересечения входящих воздушных линий передачи или шунтирование выключателей. Это может увеличить надежность и/или коэффициент готовности.
- большая компактность, закрытые газовые отсеки, система заземления и различные ремонтные требования  
Даже если надежность (коэффициент готовности) КРУЭ выше КРУВ, то упомянутые аспекты могут привести к большему числу выключателей (например, секционированию шинопровода) и к большему числу требований ко вторичному устройству (например, другое размещение измерительных трансформаторов, датчиков утечки газа, защиты от избыточного давления, сигнализаторов и диагностических/контрольных датчиков) [[5]].
- количество и размещение заземлителей

Поскольку КРУЭ заключено в оболочку и нет доступа к высоковольтному проводнику, то для каждой секции должен быть предусмотрен заземлитель.

- компактность и широкое разнообразие КРУЭ с различной конструкцией, размерами и интерфейсами, типичными для различных изготовителей или различных поколений КРУЭ.

Это может вызвать некоторые затруднения для расширения КРУЭ в будущем [[5]]. Включение определенных мер на первой стадии строительства снизит ограничения в будущем. Такие меры влияют не только на резервы здания и зоны рабочей площадки, но также и на однолинейную схему, изоляцию газа и компоновку. Их объем зависит от временной погрешности в этапах будущего расширения, от важности КРУЭ, от числа новых отсеков и от типов соединения старых и новых отсеков. Конструкция однолинейной схемы должна обеспечивать предполагаемый окончательный объем КРУЭ с точки зрения сети (схем шинпровода и коммутационной аппаратуры), а также с точки зрения соответствующей конфигурации (порядок и тип соединения всех отсеков). В некоторых случаях будет полезным сделать своевременные капиталовложения (например, в шинные разъединители и заземлители, простые съемные стыки, удлинительные трубки или шинпровода) для облегчения изменения на будущей стадии.

- комбинация силового выключателя КРУЭ и размыкателя  
Можно будет использовать силовой выключатель без подключенных параллельно конденсаторов в качестве размыкателей. В этом случае они должны выполнять требования, предъявляемые к размыкателю.

Однолинейная диаграмма, предоставленная пользователем в его заявке, должна содержать по крайней мере следующую информацию:

- схему шинпровода и все высоковольтные выключатели и устройства
- первую (обычно тема заявки) и окончательную (включено планируемое расширение в будущем) стадии строительства
- тип каждого отсека (линия, трансформатор, реактор, вспомогательный отсек)
- тип соединения каждого отсека  
КРУЭ обеспечивает несколько возможностей соединения, т.е.:
  - проходные изоляторы элегаз/воздух
  - элегазовые/кабельные муфты
  - элегазовые/масляные трансформаторные вводы или с другой изоляционной средой
  - герметизированные линии с элегазовой изоляцией (шинпровода)

Примечание: На однолинейной схеме должны быть также показаны высоковольтные устройства с воздушной изоляцией (т.е. разрядники, трансформаторы напряжения или оборудование ВВ-ВЧ), которые должны быть напрямую подсоединены к индивидуальным отсекам.

### 3.3 Схема размещения компонентов

Модульная система компонентов КРУЭ позволяет создать любую однолинейную схему (конфигурации цепи и схемы шинпровода) наиболее эффективным образом в соответствии со специальными условиями каждой индивидуальной конструкции. Что касается компоновки оборудования, то заземленная модульная система КРУЭ с учетом ее компактности и минимальных размеров обеспечивает, по сравнению с компоновками КРУВ, более широкий диапазон различных комбинаций. Это могут быть следующие компоновки, в зависимости от конструкции изготовителя и специальных условий:

- трех- или однофазная герметизация или их комбинация;
- смешанные, разделенные или связанные фазы шинпровода и/или компоновки отсека;

- одно-, двухлинейные или более компоновки выключателей;
- горизонтальная или вертикальная («U» или «Z») конструкция выключателей
- вертикальная, горизонтальная или треугольная компоновка шинпровода или с верхним или нижним фланцевым соединением.

Аргументами в пользу компоновки отсеков КРУЭ по аналогии с компоновкой КРУВ могут быть существенное возрастание стоимости и излишняя длина шинпровода, которая может снизить надежность КРУЭ. Тем не менее, для того чтобы дать возможность изготовителю спроектировать оптимальную конструкцию, пользователь должен предоставить изготовителю подробное описание исходных условий непосредственно в технических условиях в заявке. Одновременно пользователь должен избегать переопределения и должен быть готов к сотрудничеству с изготовителем и/или быть готов обдумать предложения изготовителя по изменениям с тем, чтобы процесс оптимизации был эффективным.

### **3.4 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем**

#### **3.4.1 Основные исходные данные пользователя**

Исходные данные пользователя, которые влияют на проектирование размещения КРУЭ должны включать в себя как минимум следующее:

- региональные условия окружающей среды для КРУЭ
- однолинейная схема с основными номинальными параметрами
- требования к обслуживанию, например, тип автоматического повторного включения выключателя (трехфазный, однофазный, без фазы), специальные коммутационные условия (реакторы, фильтры, длинная линия и т.п.), использование заземлителей с коммутационной способностью короткого замыкания
- форма и размеры имеющегося пространства (в случае установки дополнительного оборудования или реконструкции существующего оборудования, а также общая компоновка и техническое описание данного оборудования)
- устройство соответствующего силового оборудования на электростанции:
  - направление и ширина линейных коридоров
  - размещение силовых трансформаторов
  - размещение интерфейсных соединений
- технические параметры соединений:
  - соединение проходного изолятора элегаз/воздух: требуемые минимальные воздушные зазоры (от фазы до фазы одной системы, от фазы до фазы разных систем, от фазы до земли), принятая компоновка мачт или крепления проводника (например, напрямую к стене)
  - кабельное соединение: тип кабеля, количество кабелей и количество их жил, принятые кабельные трассы
  - изоляторное соединение «элегаз-трансформатор»: тип трансформатора (реактора) и устройство его проходного изолятора
  - элегазовые каналы: расстояние и технические характеристики интерфейсного соединения
- устройство другого оборудования на станции:
  - обычное высоковольтное оборудование (например, разрядники, измерительные трансформаторы, оборудование с воздушной изоляцией в комбинированных установках и т.п.)
  - оборудование среднего напряжения
  - система защиты и управления, диспетчерская, вспомогательное оборудование и т.п.

- специальные требования, при их наличии, например:
  - специальные требования для отделения газовых отсеков с учетом вопросов технического обслуживания и ремонта (см. также Гл. 12)
  - требования к эксплуатации КРУЭ во время его расширения в будущем
  - специальные требования к сборке: подъездные пути, воздействие на оставшееся эксплуатационное оборудование, а именно, когда КРУЭ используется для расширения или реконструкции существующего оборудования
  - требования к сейсмостойкости

### 3.4.2 Основные исходные данные изготовителя

Основное предложение изготовителя представляет собой ответ на заявку пользователя и представленные исходные данные. Следовательно, качество и полнота зависят от этих исходных данных.

Основной проект изготовителя должен включать в себя следующее:

- тип КРУЭ, включая все основные номинальные параметры
- однолинейную диаграмму
- общая компоновка (требуемые площадь и высота)
- масса КРУЭ и средние нагрузки на полы
- при необходимости требования к крану
- размещение и пространство для панелей управления
- технические решения по соединениям с другим оборудованием (проходные изоляторы элегаз/воздух, кабели, шинопроводы)
- ограничения по объему поставки с четкой идентификацией сопряженных обязанностей
- методы выполнения специальных требований

Должны быть упомянуты отклонения от исходных данных пользователя и указаны альтернативные варианты.

### 3.4.3 Оптимизация

Технические условия пользователя представляют собой набор требований различной важности. Некоторые из них являются существенными для пользователя, в то время как другие только указывают на предпочтение. Однако изготовитель не может определить эту разницу. Более того, во время стадии проведения тендера пользователи стремятся отложить такое выяснение или предложение альтернативных вариантов вследствие причин, связанных с оценкой предложения. Как следствие иногда стремление изготовителя выполнить требования технических условий, о которых пользователь и не подозревает, приводит к высокой стоимости предложения.

В связи с этим процесс оптимизации представляет собой значительный шаг на пути достижения наилучшего технического и экономического решения. Изготовитель должен четко указать, какие требования приводят к увеличению стоимости, и предложить альтернативные варианты. С другой стороны, пользователь должен быть готов к проверке необходимости их требований.

## 4 Координация изоляции

### 4.1 Общая информация

Координация изоляции в КРУЭ зависит от перенапряжений, генерируемых в ассоциированной системе и в самом КРУЭ.

Они могут состоять из

- наружного перенапряжения

- перенапряжений, индуцированных молниевыми разрядами
- перенапряжений, индуцированных коммутацией
- кратковременных перенапряжений промышленной частоты
- перенапряжений переменного тока, генерируемых условиями резонанса цепи
- напряжения, характерного для КРУЭ
  - напряжений постоянного тока
  - напряжений постоянного плюс переменного тока
  - напряжений с очень крутым фронтом

Координация обычно достигается против перенапряжений, генерируемых извне, за счет использования ограничителей перенапряжения и против перенапряжений, генерируемых внутри, за счет использования других профилактических мер. Перенапряжения необходимо учитывать таким образом, чтобы возможность отказа при изоляции была снижена до экономически и технически приемлемого уровня.

Координация изоляции является сложной темой и ниже приведены только общие соображения. Более подробное объяснение читатель может найти в документах IEC 71-1, IEC 71-2, IEC 694 и IEC 517.

Основной задачей является координация значений нагрузки от перенапряжения в КРУЭ и прочность изоляции КРУЭ.

Для данной процедуры используются два метода:

- детерминированный метод используется в тех случаях, когда отсутствует статистическая информация по этим значениям. В данном случае комплект значений принимается как самый критический и детерминистический. Они согласовываются таким образом, чтобы при таком допущении пробой не возникал. Реальный статистический разброс значений компенсируется коэффициентом безопасности.
- при статистическом методе риск неисправности фиксируется на приемлемом уровне и рассчитывается из распределения вероятности перенапряжения и возможности пробоя изоляции.

## 4.2 Характеристика пробоя элегаза

Характеристика пробоя элегаза при росте переходных перенапряжений является очень плоской в сравнении с характеристикой пробоя воздуха (см. Рис. 4.1) и, следовательно, воздушные координирующие разрядники не могут обеспечить адекватную защиту от волн с крутым фронтом.

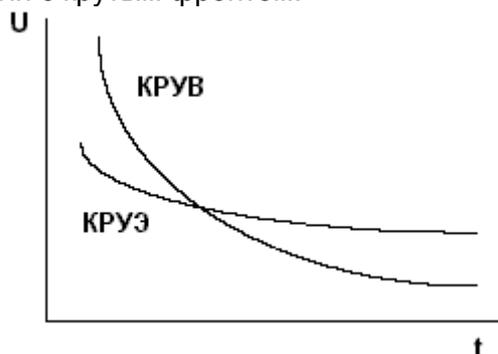


Рис. 4.1: Различные характеристики пробоя КРУВ и элегаза

Данный эффект интенсифицируется типичными конфигурациями электрического поля в КРУВ и КРУЭ. Неоднородные поля в КРУВ вызывают более сильные вариации напряжения пробоя в зависимости от времени роста напряжения в сравнении с однородными полями в КРУЭ. Разрядник должен более точно соответствовать характеристике пробоя элегаза в КРУЭ.

## 4.3 Процедура координации изоляции

Процедура координации изоляции должна проводиться в соответствии с IEC 71-1, IEC

71-2 для различных типов напряжения. Принципиальная схема процедуры предоставлена на Рис. 1 документа IEC 71-1.

Используемые ниже сокращения определены в IEC 71-1 следующим образом (соотношение между указанными значениями напряжения показано на Рис. 4.2):

$U_r$ : номинальное напряжение [IEC 694]

$U_{гр}$ : представительные перенапряжения. Они состоят из определенных перенапряжений стандартной формы и класса

$U_{сw}$ : выдерживаемое напряжение координации. Величина выдерживаемого напряжения, которое отвечает критериям по техническим характеристикам.

$K_c$ : коэффициент координации. Величина, на которую должно быть умножено  $U_{гр}$ , чтобы получить  $U_{сw}$

$U_{гw}$ : требуемое выдерживаемое напряжение. Требуемое выдерживаемое напряжение является напряжением испытаний, которое должна выдерживать изоляция в заданном испытании.

$K_s$ : коэффициент безопасности. Коэффициент, который должен использоваться для  $U_{сw}$  для получения  $U_{гw}$

$U_w$ : номинальное выдерживаемое напряжение согласно МЭК

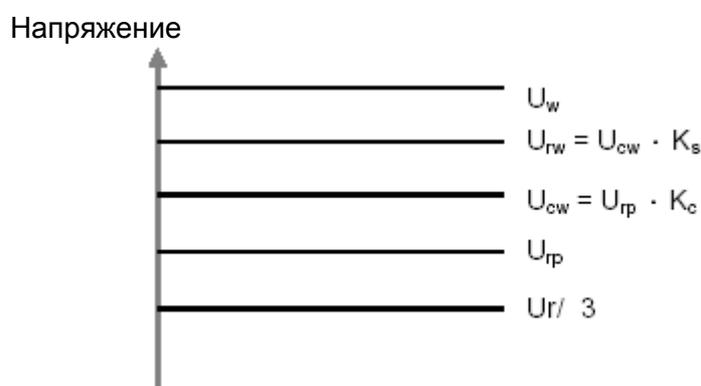


Рис. 4.2: Определения координации изоляции

Наружные перенапряжения обычно должны трактоваться таким же образом, как и для КРУВ:

- для непрерывного напряжения промышленной частоты коэффициент координации  $K_c$  равен 1,0 и выдерживаемое напряжение координации  $U_{сw}$  равно номинальному напряжению  $U_r$ , деленному на 3 (см. таблицы 1 и 2 в документе IEC 694). В любом случае используется детерминированный метод.
- для кратковременного напряжения промышленной частоты коэффициент координации  $K_c$  равен 1,0, а выдерживаемое напряжение  $U_{сw}$  равно принятому максимуму временного перенапряжения, деленному на 2 для детерминированного метода. Статистический метод редко используется для КРУЭ.
- характерное напряжение  $U_{гр}$  для перенапряжений с плавным фронтом равно защитному уровню коммутационного импульса разрядника. В зависимости от соотношения предполагаемого перенапряжения и уровня защиты разрядника для определения  $U_{сw}$  детерминированный коэффициент координации должен выбираться между 1 и 1,1. Обычно статистический метод не используется для КРУЭ.
- для определения перенапряжений с крутым фронтом детерминированный коэффициент координации  $K_c$  равен 1,0. В случае детерминированного метода необходимо рассматривать несколько различных грозových разрядов с наиболее критической формой тока в предполагаемых наиболее критичных местах и при наиболее критичных условиях коммутации. Необходим значительный опыт для обеспечения учета наиболее критического случая в течение ожидаемого срока службы КРУЭ. В связи с этим предлагается статистический метод или упрощенный

статистический метод для любого случая в соответствии с Приложением Е документа IEC 72-2 [[8]], [[9]].

Для КРУЭ специфичны следующие внутренние перенапряжения:

- для перенапряжений с очень крутым фронтом системный анализ является очень сложным. Эти перенапряжения вызываются операциями коммутации в КРУЭ. Максимальные значения этих перенапряжений зависят от падения напряжения на выключателе непосредственно перед разрядом молнии. Амплитуды  $U_{гр}$  имеют разброс вокруг среднего значения 1,5 отн. ед., связанного на напряжение  $U_r$ , умноженного на 2 и деленного на 3. Более высокие значения должны быть рассмотрены для быстро перемещающихся разъединителей и в случае сдвинутой по фазе коммутации с несколькими выключателями, соединенными последовательно. Когда секция КРУЭ обесточена, то захваченный заряд постоянного тока постоянно остается на обесточенной секции шинпровода. Обычно он может иметь величину до 1,2 отн. ед. Если соответствующий выключатель имеет выравнивающие конденсаторы в параллель его прерывателям, то на напряжение переменного тока будет наложено напряжение постоянного тока. Это напряжение переменного тока может иметь типичное значение до 0,8 отн. ед. Когда соответствующее коммутационное устройство включается повторно, то это напряжение захваченного заряда рассеивается, что в свою очередь создает импульс с очень крутым фронтом. Обычно принимаются максимальные значения 1,7 отн. ед. и 2,5 отн. ед. [[10]].

Представительное перенапряжение не устанавливается, поскольку перенапряжения с очень крутым фронтом не влияют на выбор номинального выдерживаемого напряжения для пиковых значений до 2,5 отн. ед. В общем случае принимается, что испытания изоляции стандартным импульсом молниевых разрядов соответствуют этому условию. В предельных случаях, когда перенапряжение с очень крутым фронтом может превысить величину 2,5 отн. ед., может быть необходимо применить специальные меры на номинальное напряжение 550 кВ и выше.

Для предотвращения пробоя дуги на землю в срабатывающем разъединителе, вызванного одновременными перенапряжениями с очень крутым фронтом, в документе IEC 1259 заданы специальные требования к коммутации зарядных токов шины для разъединителей на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше. На номинальное напряжение ниже 300 кВ испытания обычно не требуются.

#### 4.4 Определение выдерживаемого напряжения

На следующем этапе для определения требуемого выдерживаемого напряжения  $U_{rw}$  должны учитываться условия стандартных или типовых испытаний при помощи коэффициента безопасности  $K_s$ .

$$U_{rw} = K_s U_{cw}$$

Оказывают влияние и другие факторы, главным образом соответствующий размер всего КРУЭ и испытательного блока и разброс качества изоляции, которые компенсируются коэффициентом  $K_s$ . Для КРУЭ  $K_s$  обычно равен 1,25.

На последнем этапе должен быть выбран адекватный и наиболее экономичный диапазон выдерживаемого напряжения  $U_w$  в соответствии с таблицами 1 и 2 в IEC 694, которым охватываются все требуемые значения выдерживаемого напряжения.

#### 4.5 Действия, которые можно предпринять для достижения координации изоляции

Процесс координации изоляции обычно приводит к использованию металло-оксидных разрядников на воздушной линии или в местах кабельного ввода и на сопряжении КРУЭ/трансформатор и КРУЭ/реактор. Для небольших компактных станций КРУЭ на напряжение до 300 кВ для защиты станции КРУЭ и смежного высоковольтного оборудования обычно достаточно разрядников. Для станций КРУЭ с большими геометрическими размерами и компоновкой с длинными шинпроводами, а также для

станций КРУЭ на напряжение более 300 кВ часто требуются дополнительные разрядники на станции КРУЭ или устанавливаемые рядом с трансформаторами или реакторами.

Выбор разрядника представляет собой компромисс между способностью выдерживать временное перенапряжение, уровень защиты и энергетические способности разрядника. Разрядник должен быть устойчив для условий системы и при кратковременных перенапряжениях промышленной частоты. Когда эти условия не известны, должны выбираться достаточные запасы прочности. С другой стороны, уровень защиты должен выбираться как можно низким для того, чтобы обеспечить достаточный запас прочности между уровнем защиты разрядника и уровнем прочности изоляции оборудования. Энергетическая способность разрядника должна соответствовать напряжению, которое разрядник должен выдерживать во время перенапряжений, обусловленных коммутацией и грозовыми разрядами. Для выбора правильной способности выдерживать временные перенапряжения, уровня защиты и энергетической способности разрядников достаточно упрощенных расчетов.

Защита от перенапряжения подстанции заключается не только в выборе разрядника. Для защиты от молниевых разрядов рядом со станцией более важной является установка разрядника наиболее эффективным образом. Разрядник должен всегда размещаться как можно ближе, насколько это возможно, к защищаемому оборудованию. Для мест линейного ввода в КРУЭ это означает, что разрядник с воздушной изоляцией должен размещаться в пределах нескольких метров от проходного изолятора элегаз/воздух. Необходимо также минимизировать длину и индуктивность заземляющего соединения между оболочкой КРУЭ и точкой заземления разрядника. Для мест кабельных вводов КРУЭ разрядники обычно требуются на линейном/кабельном интерфейсе. В КРУЭ необходимо обратить внимание на компоновку с длинными шинпроводами и интерфейсы между кабелем и КРУЭ из-за возможных отражений на открытых разъединителях. Для трансформаторов и реакторов разрядник (разрядник с воздушной изоляцией или в металлической оболочке) должен размещаться как можно ближе к изолятору трансформатора и реактора. Пример непосредственного соединения КРУЭ/трансформатора с разрядниками для защиты от атмосферных перенапряжений в металлической оболочке показан на Рис. 5.6. Обычно решение по размещению разрядников для защиты от атмосферных перенапряжений может быть принято после простых расчетов на основе опыта изготовителя и пользователей.

В исключительных случаях может потребоваться детальное исследование координации изоляции для подтверждения размещения и номинальных параметров разрядника. Если ожидается, что для конфигурации КРУЭ потребуются разрядники в металлической оболочке, то изготовитель КРУЭ должен представить данные по дополнительной стоимости разрядника для оценки с начала планирования.

#### **4.6 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем**

Пользователь отвечает за адекватную координацию изоляции, так как он является единственным, кто может описать фактические условия сети. Во многих случаях эта задача выдается изготовителю или третьей стороне. В любом случае необходимо сделать акцент на том, что качество результата зависит от полноты исходных данных. Необходимо обратить особое внимание на явления феррорезонанса (см. Гл. 5.5) и перенапряжения с очень крутым фронтом (см. Гл. 6.5).

Изготовитель должен выдать следующие основные данные:

- волновое сопротивление КРУЭ
- конфигурация КРУЭ
- параметры выравнивающих конденсаторов, емкости на землю, индуктивности
- остаточное напряжение разрядников
- кривые намагничивания трансформатора напряжения, если их запрашивает

пользователь.

## 5 Основные компоненты

### 5.1 Проводник

Конструкция проводников, соединений и опор должна обеспечивать, чтобы тепловое и механическое взаимодействия вследствие нормальных токов или токов короткого замыкания не ухудшали токовую проводимость и диэлектрические характеристики КРУЭ. Основные критерии и применимые испытания определены в соответствующих международных стандартах.

Для изготовления проводника обычно используется алюминий или медь. Проводники либо непосредственно поддерживаются однофазными или трехфазными изоляторами или подсоединяются к компонентам или коммутационному оборудованию, находящимся под напряжением. В общем случае эти соединения могут быть подпружиненного или болтового типа. При соединениях болтового типа внутренняя конструкция в корпусе фиксируется, в то время как подпружиненные контакты используются для компенсации теплового расширения проводников, а также для обеспечения монтажных и производственных допусков. Соединения должны быть спроектированы таким образом, чтобы во время установки и эксплуатации электрическая прочность диэлектрика не могла ухудшиться (предотвращение генерации частиц).

Определенные конструкции КРУЭ включают в себя съемные части проводника, которые облегчают проверки, работы по техническому обслуживанию и ремонту и обеспечивают дальнейшее расширение. Особенно в случае испытаний изоляции КРУЭ на рабочей площадке основные устройства типа кабелей, трансформаторов и разрядников должны быть отсоединены. Съемный проводник также полезен на шинопроводах для ограничения воздействия во время проверок, работ по техническому обслуживанию и ремонту и расширения.

### 5.2 Оболочка

Газовые оболочки обычно изготавливаются из стали или алюминиевого сплава. Требуется, чтобы они отвечали требованиям определенных критериев проектирования для работы под давлением, которые в настоящее время в основном содержатся в международных стандартах. Тем не менее, в некоторых странах до сих пор используются юридические критерии, определенные законодательством, и в первую очередь должны быть выполнены требования, преобладающие в данной стране.

Метод болтового крепления смежных корпусов должен обеспечивать долговременную электрическую проводимость для протекания токов, индуцируемых в оболочке, и должен обеспечивать постоянное сопротивление для переходных перенапряжений коммутации. Для того, чтобы компенсировать тепловое расширение, требуются сильфоны или аналогичные устройства (см. 5.9.1). Если по какой-либо причине требуется электрическое разделение, будет необходимо принять специальные меры во избежание искрения через фланцы (например, варисторное шунтирование).

Для предотвращения или уменьшения индуцированного тока в системе заземления оболочки каждой фазы должны быть связаны соединительными цепями, спроектированными таким образом, чтобы противостоять циркулирующим токам. Эти цепи, подсоединенные к системе заземления, лучше всего размещать рядом с соединением КРУЭ с другими элементами (проходными изоляторами, кабелями и трансформаторными соединениями) и на концах шинопроводов. Другие рекомендации по системе заземления см. в [[2]].

Конструкция оболочки должна быть такой, чтобы ограничивать утечку газа в течение ожидаемого срока службы оборудования до очень низких уровней [[11]]. Срок службы герметичных уплотнений должен быть не менее ожидаемого времени службы всего комплектного распределительного устройства.

Все газовые зоны обычно оснащены средствами безопасного сброса избыточного давления, которое может развиваться в случае внутренней неисправности, переполнения элегазом или по другим причинам. Методика координации давления должна идеально обеспечивать первичную защиту для выявления неисправности до срабатывания устройства сброса давления, которое должно произойти до сквозного проплавания.

### **5.2.1 Оболочка для трех фаз или одной фазы**

Основные компоненты могут быть либо трехфазными в оболочке или с фазовым разделением. Вся подстанция обычно представляет собой смесь обоих типов. В общем случае для более высоких уровней напряжения имеется тенденция к использованию однофазных комплектных распределительных устройств в оболочке. С точки зрения пользователя должны быть учтены следствия трехфазного пробоя на землю, которые могут возникнуть в трехфазном КРУЭ в оболочке. Первостепенное внимание должно быть уделено проблемам устойчивости в переходных режимах объединенных цепей и/или самой системы.

### **5.2.2 Разделение газовых зон**

Оборудование должно быть разделено на достаточно независимые газовые зоны для обеспечения требуемой степени эксплуатационной гибкости. При разделении газовых зон должны учитываться правила, описанные в Гл. 12.3.2.1.

В общем случае должен быть обеспечен простой доступ к датчикам и местам заправки газом. С другой стороны, с точки зрения обеспечения герметичности, необходимо стремиться к уменьшению системы трубопроводов. Окончательное решение должно быть согласовано между пользователем и изготовителем.

В настоящее время общей практикой для каждой газовой зоны, в которой может возникнуть коммутационная дуга, должны использоваться сиккативы для поглощения водяного пара и продуктов пробоя в газе. Поглощение водяного пара должно быть выполнено в каждой газовой зоне.

Соединения газоснабжения должны быть одного и того же типа по всей подстанции. Многие пользователи предпочитают самоуплотняющийся тип соединений. Диаметр газовых соединений между различными корпусами должен быть достаточно большим для обеспечения быстрой откачки.

### **5.2.3 Изоляционные прокладки**

В КРУЭ изоляционные прокладки используются для поддержки внутреннего проводника при нормальной эксплуатации и условиях пробоя. Используются два типа прокладок: герметичные и обеспечивающие проход газа. Конструкция барьеров газовой зоны (только для герметичных прокладок) должна быть такой, чтобы выдерживать следующие перепады давления, которые могут возникнуть во время эксплуатации в зависимости от конструкции КРУЭ (дополнительную информацию см. в Европейском стандарте EN 50089):

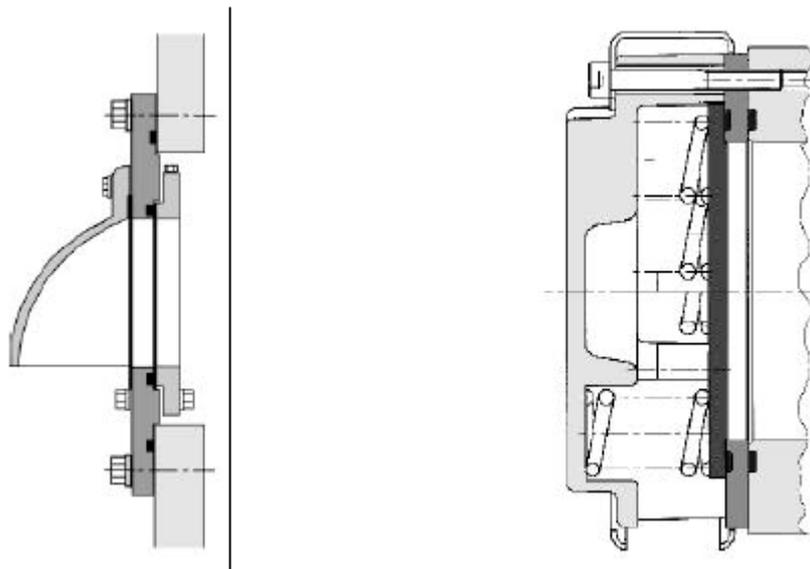
- номинальная плотность заполнения с одной стороны и вакуум с другой стороны;
- номинальное давление с одной стороны и контролируемое избыточное давление с другой стороны;
- максимальный рост давления в результате внутренней дуги с одной стороны и атмосферное давление с другой стороны.

Барьеры газовой зоны должны выдерживать эти перепады давлений в обоих направлениях напряжения. Если возникнет необходимость в работах по ремонту и техническому обслуживанию в зоне, смежной с прокладкой под давлением, то это должно быть учтено в конструкции барьера газовой зоны. Вопросы технического обслуживания, включая требования по технике безопасности см. в разделе 12.2.1.

### **5.2.4 Устройства сброса давления**

Устройства сброса давления должны обеспечить защиту корпуса от недопустимого

избыточного давления. Рекомендуется установить такое устройство в каждой газовой зоне. В некоторых странах до сих пор применяются законодательно утвержденные критерии и в первую очередь должно быть обеспечено выполнение требований, действующих в данной стране.



Обычно используются два различных типа устройств сброса давления: не самозакрывающееся (дискового (Рис. 5.1) или болтового типа) и самозакрывающееся (Рис. 5.2). В случае не самозакрывающегося типа диск может быть выполнен из металла или графита.

Для того чтобы избежать угрозы для персонала при маловероятном событии срабатывания устройства сброса давления отверстие устройства должно размещаться в безопасном месте и/или струя выпускаемого газа должна быть повернута в безопасном направлении (также см. раздел 12.3.1.2).

Основным принципом является ограничение срабатывания устройства сброса давления до срабатывания основной защиты, что ограничивает тем самым возможность загрязнения подстанции и соответствующего оборудования продуктами разложения при маловероятном событии внутреннего пробоя. Пока данный принцип может быть в основном обеспечен при больших объемах газа, его достижение может быть затруднено при меньших объемах газа и необходимо выполнять руководство изготовителя. В связи с этим данный вопрос должен быть рассмотрен перед окончательным утверждением требований к разделению газовых зон.

### 5.3 Коммутационные устройства

Все выключатели КРУЭ должны быть оснащены надежными устройствами индикации. Выключатели могут быть оснащены одним приводом для всех трех фаз или индивидуальными приводами для каждой фазы.

#### 5.3.1 Силовые выключатели

Приводы силовых выключателей могут быть гидравлического, пневматического или пружинного типа. В общих чертах соображения по цепям контроля и управления являются теми же самыми, что и для обычных элегазовых выключателей. Если силовой выключатель оснащен индивидуальным приводом для каждой фазы, то возможна операция повторного автоматического однофазного включения.

При использовании силовых выключателей с несколькими зазорами контактов, постоянно требуются конденсаторы на зазорах контактов в целях управления напряжением. Эти конденсаторы должны учитываться в комбинации с индуктивными трансформаторами напряжения для явлений феррорезонанса (см. Гл. 5.5) и для учета перенапряжения.

### 5.3.2 Другие выключатели

Выключатели КРУЭ в основном приводятся в действие двигателем, а пользователь может также потребовать блокировку выключателей, исключающих их как механическое, так и электрическое срабатывание.

#### 5.3.2.1 Разъединители

Основным назначением разъединителя является обеспечение надежного изоляционного расстояния между двумя частями цепи в течение всего времени. Любая нормальная операция коммутации, которую должен выполнить разъединитель, не должна вызывать снижение диэлектрической целостности изоляционного расстояния. Это особенно важно в том случае, когда, например, переключаются токи перераспределения нагрузки или когда заземлители могут быть встроены в дугогасительную камеру. Размыкатели должны быть также способны переключать емкостные токи шинпровода или выдерживать переходные перенапряжения, индуцированные очень быстрой коммутацией, а также выдерживать захваченный заряд постоянного тока (с наложенным зарядом переменного тока), который может остаться на шинпроводах. Если разъединители связаны с цепями генератора, то может потребоваться, чтобы они производили выключение при асинхронном напряжении холостого хода.

При конструкции с двойным шинпроводом для токов, передаваемых по шине, требуется разъединитель, обладающий функциями как отключения, так и включения в зависимости от величины переключаемой нагрузки и размера контура между размещением шинного соединения и разъединителя, который должен срабатывать.

Требования к проведению испытаний для многих описанных условий коммутации в настоящее время объединены в международные стандарты (см. Гл. 10 и Гл. 4.3).

В некоторых странах требуются устройства для непосредственной проверки рабочего положения контактов разъединителя, а именно смотровые окна. В настоящее время многие пользователи применяют принцип индикации внешнего положения, обеспечивающий то, что при этом всегда верно показывается состояние внутренних контактов. Достоверность такой внешней индикации подтверждается стандартами МЭК, и многие пользователи применяют данный метод.

#### 5.3.2.2 Выключатели для отключения нагрузки

В прошлом разъединители использовались в основном в подстанциях КРУВ и рассматривались как неэкономичные для КРУЭ. Тем не менее, при современных технологиях прерывания тока они вновь становятся более экономичными и могут выполнять коммутационные операции, лежащие между возможностями разъединителя и силового выключателя.

#### 5.3.2.3 Заземлители

Вследствие герметизированного основного проводника число рекомендованных заземлителей в случае КРУЭ выше. Принципы заземления КРУЭ для технического обслуживания описаны в разделе 12.3.1.1 и они могут отражать три основных концепции:

- постоянно закрепленные устройства с силовым приводом или с медленным ручным приводом;
- постоянно закрепленные устройства с силовым приводом или с быстрым ручным приводом (с запасаемой энергией), способные надежно производить включение в цепях под напряжением, выдерживающие ток, связанный с пробоем, и удовлетворительно выключающиеся после этого без внутреннего повреждения КРУЭ;
- портативное заземляющее устройство в качестве дополнительного инструмента.

Заземлители, выполняющие короткое замыкание, в основном используются на входящих заземляющих линиях. Постоянно установленные заземлители должны быть

способны производить включение и отключение при всех условиях работы без нагрузки, существующих для конкретной установки, например, индуцированные линейные емкостные и индуктивные токи при эксплуатации параллельных линий (см. IEC 1129).

При использовании изолированных заземлителей, например, в целях технического обслуживания или для того, чтобы обеспечить доступ в первичную цепь для проверок, в общем случае требуется, чтобы они были заизолированы, чтобы выдерживать напряжение порядка от 1 до 10 кВ между контактом заземлителя и оболочкой.

#### 5.4 Трансформаторы тока (ТТ)

Трансформаторы тока тороидально-кольцевого типа обычно используются в КРУЭ в тех случаях, когда проводник формирует первичную обмотку. Такие ТТ могут располагаться внутри корпуса КРУЭ (Рис. 5.3). В этом случае обычно между проводником и узлом вторичной сборки ТТ устанавливается втулка регулировки напряжения. Такие ТТ могут быть также оснащены дополнительной токовой обмоткой большого сечения, состоящей из нескольких витков, которая обеспечивает проверку ТТ и защиты.

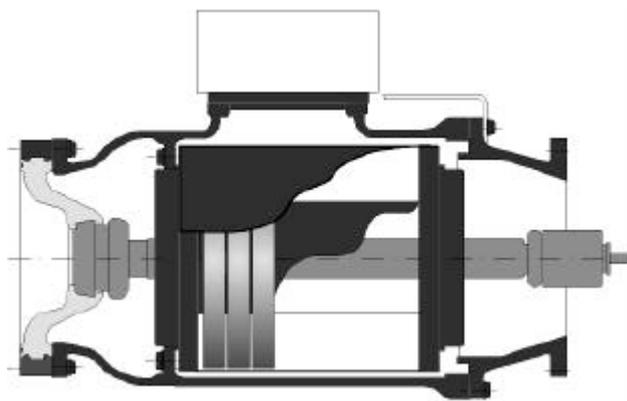


Рис. 5.3: Трансформатор тока, установленный внутри в корпусе КРУЭ

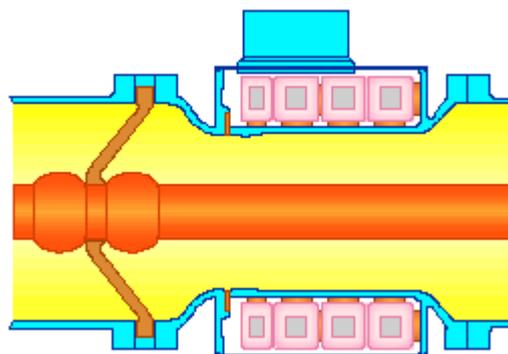


Рис. 5.4: Трансформатор тока, установленный снаружи корпуса КРУЭ

В противоположность этому в случае однофазного герметичного КРУЭ ТТ могут быть установлены снаружи корпуса КРУЭ (Рис.5.4), и необходимо, чтобы в корпус КРУЭ был встроены разрыв (изоляционное кольцо) во избежание витка короткого замыкания ТТ. Однако такой разрыв формирует высокое волновое сопротивление для напряжения сверхбыстрых переходных процессов (СПП), которое может вызвать поверхностный пробой изоляции в этом месте. Для смягчения такого пробоя может быть установлено варисторное шунтирование. Другим вариантом является шунтирование наружного тока, но эти шунты не всегда могут ограничить поверхностный пробой СПП изолированного фланца.

В зависимости от требований к измерению и защите ТТ могут включать в себя переменное число сердечников (до 5), которые могут иметь один или более коэффициент передачи по току (отводов). Число сердечников, их устройство и размещение могут влиять на компоновку КРУЭ.

Для современного цифрового защитного оборудования требуется меньшая входная мощность. Это дает возможность использовать новые, альтернативные трансформаторы тока, которые вероятно появятся в самом ближайшем будущем (см. главу 14). Эти новые трансформаторы будут описаны в будущем стандарте IEC 44-8. Они могут быть разделены на две различные группы в зависимости от интерфейсов между защитным оборудованием и датчиками:

- датчики с аналоговым выходным сигналом низкой мощности  
Пользователь должен проверить выходную мощность и число датчиков для того, чтобы обеспечить сопряжение ТТ с современным вспомогательным оборудованием.

- датчики с последовательным цифровым выходным сигналом шины данных. Требования к ошиновке будут входить в будущий стандарт IEC 1850. Пользователь должен проверить совместимость вспомогательного оборудования, ошиновки и датчика.

## 5.5 Трансформаторы напряжения (ТН)

В КРУЭ обычно используются трансформаторы напряжения электромагнитного типа. Трансформаторы емкостного типа использовались в предыдущих конструкциях КРУЭ, однако в настоящее время они применяются редко. Высоковольтная обмотка электромагнитного трансформатора напряжения состоит из многих километров провода, который должен быть механически и термически стойким, а также иметь соответствующий класс изоляции. Преимуществами электромагнитных трансформаторов напряжения являются относительно большие выходные мощности и высокие точности измерения. В принципе вторичная обмотка может быть напрямую подсоединена к защитным или измерительным устройствам. Если электромагнитный трансформатор напряжения находится на окончании линии, то захваченные заряды постоянного тока, оставшиеся на отсоединенной линии, будут рассеиваться. Таким образом, переходные перенапряжения коммутации могут быть снижены, в частности, для быстрого автоматического повторного включения.

Индуктивность первичной обмотки может быть такой, чтобы вызвать резонанс с выравнивающими конденсаторами и/или с емкостью соответствующего шинпровода КРУЭ. При таких условиях могут возникнуть высокие перенапряжения, результатом чего может быть тепловое повреждение. Изготовитель должен принять меры по предотвращению резонанса на основе информации, предоставленной пользователем по компонентам, подсоединенным к КРУЭ, и предназначенной нагрузке вторичной цепи. Соответствующие меры могут представлять использование специально разработанных трансформаторов напряжения или дополнительных нагрузок вторичной цепи, например, омических резисторов или индуктивностей и/или выполнением инструкций по правильной последовательности коммутации.

Конструкция современных электромагнитных трансформаторов напряжения включает в себя внутреннее экранирование для ограничения взаимодействия импульсов сверхбыстрых переходных процессов со вторичными системами (управления) до значения, заданного в документе IEC 694, Приложение 2.

Также как и в случае трансформаторов тока, для трансформаторов напряжения, используемых вместе с современными микропроцессорными устройствами управления и защиты, аналогично нужна значительно меньшая входная мощность и они могут быть классифицированы таким же образом (см. раздел 5.4). В связи с этим в ближайшем будущем вероятно, что обычные трансформаторы будут заменены на более простые и экономичные датчики напряжения (например, емкостные делители или оптические системы) (см. Гл. 14) и будут описаны в будущем стандарте IEC 44-7.

## 5.6 Разрядники

Разрядники для защиты КРУЭ от атмосферных перенапряжений могут быть либо с воздушной изоляцией, либо в металлической оболочке. Безззорные разрядники должны использоваться в металлическом корпусе. Разрядники в металлической оболочке имеют тенденцию к высокой стоимости, в связи с чем разрядники с воздушной изоляцией используются для защиты на линейных входах. Тем не менее такие разрядники в некоторых случаях могут не подходить для защиты всего КРУЭ. Достаточно общей практикой является установка разрядников в металлической оболочке для защиты трансформаторов или реакторов (Рис. 5.5), они также могут потребоваться для защиты открытых мест в подстанции КРУЭ, где может произойти удвоение напряжения.

В случае очень быстрых переходных перенапряжений их влияние ограничено вследствие очень быстро возрастающего волнового фронта. В таких случаях необходимо ознакомиться с руководствами изготовителя трансформатора и изготовителя разрядника. Подробная информация по размещению и требуемому

количеству разрядников предоставлена в разделе 4.5.

### 5.7 Кабельное соединение КРУЭ

Кабели обеспечивают соответствующую возможность подсоединения КРУЭ к другим системам электропередачи (в очень компактной форме, которую трудно достичь при воздушных линиях). Они обеспечивают множество конфигураций, например, установка под землей или пересечения.

Кабельные соединения КРУЭ должны быть спроектированы таким образом, чтобы изоляционная среда кабеля и элегаз КРУЭ были разделены и не влияли друг на друга. Для обеспечения совместимости КРУЭ и кабельных систем различных изготовителей должен быть не только стандартизован уплотнительный конец кабеля, но также и пределы поставки обоих изготовителей для различных частей кабельного соединения, определенных в документе IEC 859. Пределы ответственности оговорены в торговом договоре.

Кроме того, оболочки корпуса КРУЭ должны быть спроектированы таким образом, чтобы учесть движение, вибрацию, возможность установки дополнительного оборудования и некоторые вопросы, относящиеся к испытаниям кабелей на рабочей площадке. Для обеспечения испытаний кабелей, отделенных от КРУЭ, кабельная муфта и/или само КРУЭ должны быть оснащены изолирующей связью и концевыми контактами для источника электропитания для испытаний, если это требуется пользователем. Если части КРУЭ подвергаются воздействию этого испытательного напряжения, то пользователь и изготовитель должны согласовать уровень напряжения постоянного тока, которое должно использоваться для испытаний кабеля. Пример кабельного соединения КРУЭ показан на Рис. 5.6.

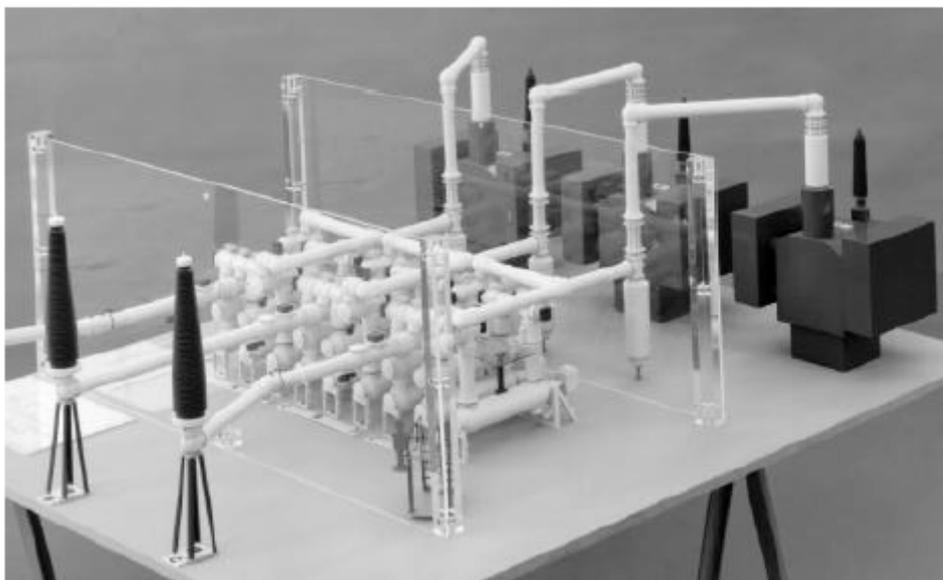


Рис. 5-5: Модель подстанции КРУЭ с непосредственным соединением через шинопровод с элегазовой изоляцией и разрядники для защиты от атмосферных перенапряжений в металлической оболочке.

Системы заземления КРУЭ и соединительный кабель должны быть в некоторых случаях изолированы друг от друга. В этом случае открытое соединение должно быть защищено от перенапряжения.

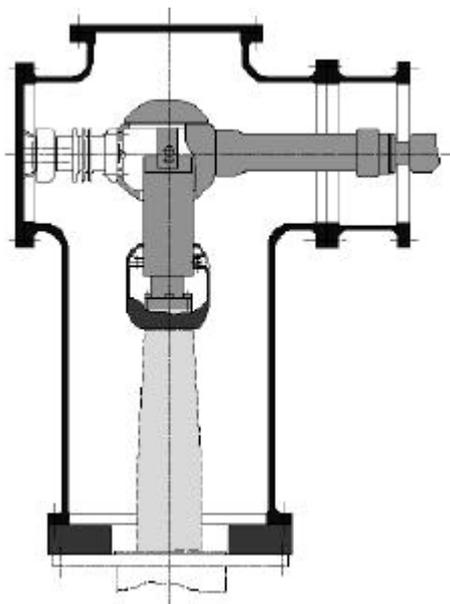


Рис. 5-6: Кабельное соединение КРУЭ

## 5.8 Воздушные проходные изоляторы

Воздушные проходные изоляторы предусмотрены для соединения воздушной линии с КРУЭ. Они однозначно поставляются изготовителем КРУЭ. Они формируют единственный компонент КРУЭ с изоляцией на землю, подвергающийся воздействию преобладающих окружающих условий. Следовательно, длина пути тока утечки должна соответствовать атмосферным условиям. Значения номинальной длины пути тока утечки определены в IEC 815.

Корпус воздушных проходных изоляторов может быть фарфоровым или композиционным (стеклопластиковая труба с юбками из силиконовой резины). Последний вариант является практически непробиваемым и более безопасным для персонала и оборудования в случае внутреннего (т.е. внутренний пробой) или наружного воздействия.

Изоляция между внутренним проводником и корпусом может состоять из элегаза или пропитанной смолой изоляционной бумаги (RIP). Пространство между RIP и корпусом может быть заполнено сжатым элегазом или изолирующим пенообразующим составом.

Необходимо уделить внимание влиянию атмосферных условий и загрязнению, в частности, если проходные изоляторы устанавливаются под углом более 30° от вертикальной оси. Усилия, прилагаемые к линейному соединению, не должны превышать заданные значения.

## 5.9 Подсоединение к трансформаторам и реакторам

Подсоединения к трансформаторам и реакторам может быть разделено на три основные категории. В специальных случаях возможна комбинация этих категорий.

### 5.9.1 Прямое подсоединение через шинопровод с элегазовой изоляцией

Прямое подсоединение через шинопровод имеет преимущество, заключающееся в том, что отсутствует оборудование, которое подвергается воздействию окружающей среды. Кроме того, минимизированы требования к занимаемому пространству шинопровод с элегазовой изоляцией показано на Рис. 5-5.

Специальное внимание должно быть уделено прямому соединению КРУЭ с трансформаторами и реакторами. Необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- осадка платформы трансформатора
- вибрация трансформатора
- большие изменения по длине вследствие более высокой температуры трансформатора
- силы, действующие на КРУЭ в случае землетрясения.

Для решения указанных выше вопросов обычно требуется установка дополнительных компенсационных стыков/сильфонов рядом с трансформатором и очень тщательная координация работ между пользователем и изготовителем КРУЭ и трансформатора, соответственно. Проходной изолятор элегаз/масло должен поставляться изготовителем трансформатора. Должно быть четко определено, кто отвечает за согласование соединительных фланцев между КРУЭ и проходным изолятором

элегаз/масло. В стандартах определены пределы поставки и устройство сопряжения для обеспечения электрической и механической взаимозаменяемости (IEC 1639).

Системы заземления КРУЭ и трансформатора должны быть в некоторых случаях изолированы друг от друга. В этом случае разомкнутое соединение должно быть защищено от перенапряжения.

### **5.9.2 Подсоединение через кабель**

Подсоединение через кабель имеет те же самые преимущества, описанные выше для прямого соединения, но при этом обеспечивает механическое разъединение КРУЭ и трансформатора вследствие своей гибкости. Более подробную информацию о кабельных соединениях КРУЭ см. в разделе 5.7.

### **5.9.3 Подсоединение с короткими воздушными линиями**

Соединение КРУЭ/трансформатор через короткие воздушные линии обладает преимуществом полной независимости от изготовителя и конструкции трансформатора. Следовательно, использование обычных разрядников, а также запасных трансформаторов облегчается.

С другой стороны, проходные изоляторы подвергаются воздействию окружающей среды. Кроме того, требуется, чтобы был обеспечен зазор между фазами (для чего требуется большее пространство).

## **5.10 Соединительные элементы в КРУЭ**

### **5.10.1 Компенсаторы**

Компенсаторы компенсируют осевые, продольные и угловые силы вследствие теплового расширения, сейсмических воздействий или допусков на изготовление. Часто компенсаторы также необходимы для обеспечения разборки КРУЭ для выполнения работ по техническому обслуживанию или ремонту.

### **5.10.2 Соединительные элемент**

Соединительный элемент представляет собой компонент шинпровода. Обычно он имеет телескопическую форму и обеспечивает разборку и вставку секций шины без демонтажа других компонентов КРУЭ для сборки, технического обслуживания, ремонта и надстроек.

### **5.10.3 X-, Т-образные оболочки / оболочки углового типа**

При X-, Т-образных оболочках и оболочках углового типа, а также прямых частей (шинпровода) вывод КРУЭ может быть выведен к любому месту пространства, необходимому для подсоединения к другим компонентам. Такие части обеспечивают очень многофункциональные и комплексные устройства. Иногда они используются в качестве мест ответвления или для крепления соединительных компонентов, например, проходных изоляторов.

## **5.11 Паспортные таблички / маркировка**

Ввиду сложности КРУЭ и для того, чтобы минимизировать возможности эксплуатационных ошибок, важно, чтобы основные компоненты были соответствующим образом идентифицированы. Обычно используются следующие обозначения:

- по крайней мере каждый отсек КРУЭ и измерительные трансформаторы имеют паспортные таблички;
- каждое механическое коммутационное устройство имеет прикрепленную к нему на видном месте этикетку со справочной информацией по эксплуатации для пользователя;

- фазы каждого отсека КРУЭ (и шинопроводы) обозначаются соответствующей фазовой идентификацией;
- каждое разделение между газовыми зонами четко промаркировано;
- каждый датчик давления или плотности снабжен этикеткой, на которой указан параметр, который он измеряет;
- на каждом клапане имеется этикетка с обозначением его газовой зоны;
- каждое место низковольтной изоляции имеет этикетку с обозначением его функции;
- каждый шкаф, панель или будка имеет этикетку с указанием его соответствующего основного оборудования.

Язык, используемый для этикеток, должен быть согласован между пользователем и изготовителем.

Кроме того, может быть предоставлена схема постоянного газоснабжения, показывающая все основные функциональные устройства в пределах их элегазовых отсеков. Эта схема должна быть выполнена таким образом, чтобы соответствовать (как можно ближе) физической компоновке оборудования, и на ней должны быть показаны все газовые барьеры, газовые клапаны, трубная обвязка и/или места контроля газа. Газовая схема должна быть постоянной и установлена в удобном месте для ее использования персоналом, осуществляющим эксплуатацию и техническое обслуживание.

## **5.12 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем**

Основная информация, необходимая для определения основных компонентов КРУЭ, может быть взята из раздела 3.4. Подробная информация, обмен которой должен осуществляться между пользователем и изготовителем, описана в соответствующих стандартах на конкретные компоненты. Использование стандартов аналогично тому, которое характерно для проектирования КРУЭ. Специальное внимание должно быть уделено подробным техническим условиям на все сопряжения КРУЭ.

## **6 Вспомогательное оборудование**

Определение вспомогательного оборудования в общем охватывает индивидуальные компоненты, которые формируют часть систем защиты, управления и контроля комплектного распределительного устройства.

Эти позиции оборудования, которые включают в себя все устройства, необходимые для эксплуатации, инспекции, защиты, управления и контроля основного оборудования, во многих случаях аналогичны тем, которые используются в КРУВ. Тем не менее, в некоторых зонах необходимо уделить особое внимание вспомогательному оборудованию вследствие природы КРУЭ.

Традиционно местные панели отсека КРУЭ оснащаются следующим оборудованием:

- местные средства управления;
- блокировки отсека с фиксированной разводкой;
- визуальные/звуковые аварийные индикаторы;
- интерфейс для дистанционного управления.

Тенденция к внедрению цифровых систем контроля и защиты и движение в направлении так называемых «интегрированных систем» вносят основные изменения и преимущества в архитектуру вспомогательных систем на высоковольтных подстанциях в конкретных КРУЭ. Современные цифровые устройства освобождают от необходимости иметь дискретные устройства для каждой функции, они позволяют обработку нескольких функций на одной и той же аппаратной платформе при помощи специальных программных модулей. Это обеспечивает возможность разместить все функциональные устройства, связанные с отсеками КРУЭ, в локальной панели отсека

рядом с отсеком КРУЭ. Это обеспечивает существенные преимущества с точки зрения резкого уменьшения необходимой кабельной разводки, а также снижения количества требуемого вспомогательного оборудования. Внедрение этих новых технологий также обеспечивает возможность внедрения усовершенствованных средств контроля и диагностики [[7], [12]].

### **6.1 Блокировка**

Требования к блокировке и ее средства для КРУЭ являются теми же самыми, что и для КРУВ, поскольку большинство пользователей требуют точных и надежных средств защиты от потенциально опасной неправильной работы комплектного распределительного устройства. Пока КРУЭ по своей природе является более безопасным, чем эквивалентное КРУВ, для его конструкции могут потребоваться различные эксплуатационные подходы. Большинство пользователей задают чисто электрическую/электронную схему блокировки с механическими устройствами безопасности для обеспечения безопасной аварийной эксплуатации оборудования вручную или текущего технического обслуживания и ремонта.

### **6.2 Контроль газа**

Система контроля газа предназначена для проверки того, что заданные уровни плотности элегаза поддерживаются в каждой индивидуальной газовой зоне. Данная функция наиболее важна в КРУЭ, поскольку электрическая прочность изоляции на землю и через разомкнутые контакты определяется давлением элегаза. На КРУЭ используются несколько контрольных устройств:

- датчик давления с температурной компенсацией или выключатель с контактами подачи сигнала тревоги;
- манометр с отдельными реле плотности;
- датчик давления с отдельной температурной компенсацией;
- датчик плотности, независимый от температуры.

Обычно для всех газовых отсеков КРУЭ предусмотрены две стадии подачи аварийного сигнала об утечке газа. Первая стадия возникает в том случае, когда давление газа немного выше, чем минимальное функциональное давление. На этой стадии пользователь должен проверить и дозаправить газовый отсек в течение приемлемого времени. Вторая стадия подачи аварийного сигнала для выключателей, иногда для размыкателей, а также для других коммутационных устройств включает в себя блокировку их работы (аналогично процедуре с обычными элегазовыми выключателями). При подаче повторного аварийного сигнала персонал должен немедленно проверить состояние вспомогательной системы и если неисправность не обнаружена, вывести соответствующую часть КРУЭ из эксплуатации. Разумеется, что возможно, однако не рекомендуется, соединить аварийный сигнал силового выключателя с сигналом принудительного расцепления. При таких условиях пользователь должен быть осведомлен в том, что сигнал принудительного расцепления может вызвать неправильное действие из-за меньшей надежности вспомогательного оборудования.

Если выключатель работает с номинальным давлением элегаза, которое выше давления в смежных отсеках, то иногда рекомендуется, чтобы смежные отсеки были оснащены третьим устройством подачи сигнала аварии, указывающим на превышение давления (плотности).

Так как утечки элегаза являются основной причиной непригодности комплектного распределительного устройства к эксплуатации, то контроль элегаза является важной частью вспомогательной системы КРУЭ [[13]].

### **6.3 Контроль состояния КРУЭ**

В контроль состояния входят как периодическая, так и непрерывная системы контроля, в которых датчики, контрольное оборудование и возможности для интеграции могут сильно отличаться. Так как цифровые управление и защита становятся

интегрированными, включая функции контроля, то акценты будут смещаться к более непрерывному контролю, который в свою очередь влияет на тип датчиков, используемых на оборудовании КРУЭ. Дополнительную информацию см. в главе 14.

Для КРУЭ специфичны следующие системы контроля, которые обыкновенно используются сегодня:

#### Выявление частичного разряда (ЧР)

Разработаны методики на основе электрических или акустических УВЧ (ультравысокой частоты) методов выявления частичного разряда. Весьма вероятно, что такой мониторинг состояния будет становиться все более общей частью вспомогательного оборудования КРУЭ. Электрические методы с самой высокой чувствительностью приводят к необходимости введения датчиков внутрь газовых отсеков, в то время как для акустических и некоторых электрических методов датчики располагаются снаружи оболочки. Они обладают меньшей чувствительностью для некоторых причин ЧР (например, дефектов в эпоксидной смоле).

#### Место пробоя

Если в КРУЭ возникает поверхностный пробой на землю, то маловероятно, что изоляция сама восстановится и точное место пробоя не может быть сразу же видимым. Хотя такие пробои в КРУЭ являются редкими, некоторые пользователи и изготовители оснащают КРУЭ устройствами определения места пробоя для содействия идентификации точного места пробоя. Такие устройства могут использовать оптические, электромагнитные, акустические и химические датчики, датчики избыточного давления или термочувствительную краску.

### **6.4 Специальные требования КРУЭ к системе защиты**

Основные вопросы проектирования систем защиты для КРУВ и КРУЭ являются одними и теми же. Тем не менее имеются некоторые особенности КРУЭ, которые нужно учитывать. Наиболее важными являются следующие:

#### Синхронизация системы защиты

Должно быть достигнуто быстрое устранение пробоя для того, чтобы минимизировать повреждение оборудования и риск выброса загрязняющего элегаза в атмосферу в маловероятном случае внутреннего пробоя. Изоляция в КРУЭ не является самовосстанавливающейся и чем дольше существует пробой, тем сильнее может быть повреждение и, следовательно, может быть более длительный период простоя. Допустимое максимальное время для устранения пробоя и соответствующие технические условия на конструкцию и испытания КРУЭ, относящиеся к внутренним пробоям, включены в документ IEC 517.

#### Автоматическое повторное включение

В дополнение к устранению повреждений наружных цепей защита, используемая на КРУЭ, должна обеспечивать отсутствие повторного автоматического включения в случае внутреннего пробоя КРУЭ. Ясно, что любое такое повторное включение может повлечь за собой опасность для персонала и почти определенно привести к более сильному повреждению и более длительным периодам простоя и ремонта.

#### Защита шинпровода и отсека

Должна использоваться защита шинпровода. Для того чтобы минимизировать время устранения неисправности, она должна быть спроектирована таким образом, чтобы обесточивалась только неисправная секция, а максимальное количество цепей оставалось бы под напряжением. Это может повлечь за собой использование большего числа сердечников ТТ и размещений, чем это характерно для станции с КРУВ.

#### Прерывание

Для пробоев на соединениях КРУЭ с наружными цепями защита должна быть согласована с дистанционной конечной защитой цепи, и быстрое устранение неисправности должно быть достигнуто за счет использования цепей прерывания.

Защита от пробоя на землю

В КРУЭ с однофазными оболочками, используемыми в системах без жестко заземленной нейтрали обычная защита может быть непригодна для выявления пробоя на землю. В связи с этим требуются системы, способные выявлять ток возврата через землю.

## 6.5 Электромагнитная совместимость

Хорошо известно, что в КРУЭ генерируется высокочастотное неустановившееся напряжение, которое по генерации, передаче и затуханию отличается от процессов в КРУВ; это может наложить дополнительные требования на вспомогательное оборудование, связанное с КРУЭ [[14], [15]].

Высокочастотное неустановившееся напряжение, генерируемое при срабатывании выключателей, разъединителей и заземлителей, или при условиях пробоя, в общем случае ограничивается внутренним объемом экранирующей оболочки, обеспечиваемой оболочкой КРУЭ. Однако все КРУЭ включает в себя разрывы, которые обеспечивают возможность передачи высокочастотных эффектов за пределы КРУЭ. В результате таких возмущений, генерируемых в подстанции, вспомогательное оборудование, связанное с КРУЭ, подвергается двум типам электромагнитного воздействия:

- излучаемые электромагнитные поля
- электропроводность в проводниках, связанных с оборудованием (напряжение общего или дифференциального режимов).

Фундаментальная разница между КРУЭ и КРУВ заключается в основном в спектре используемых частот. Принимая во внимание, что в конструкции КРУЭ и связанного с ним оборудования предприняты определенные меры, сложности электромагнитной совместимости можно преодолеть. В документе IEC 694 представлены специальные инструкции по обращению с вспомогательным оборудованием.

Чем больше электронного оборудования используется в окружении подстанции КРУЭ для интегрированного управления, защиты и контроля, тем выше потенциальный риск возникновения проблем ЭМС. В связи с этим внимание должно быть уделено следующему:

- конструкции системы заземления КРУЭ;
- экранированию и концевой заделке кабелей;
- экранированию локальных панелей управления, содержащих чувствительное электронное оборудование, установленное непосредственно на КРУЭ;
- экранированию и защите индивидуальных компонентов вспомогательного оборудования в тех случаях, когда это приемлемо;
- повышенному использованию методов невосприимчивой связи, таких как применение оптоволоконной связи.

Более подробную информацию см. в [[2], [14], [15], [16]].

## 6.6 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем

В КРУВ и КРУЭ основное и вспомогательное оборудование может поставляться различными изготовителями. В этом случае важно, чтобы пользователь и изготовитель описывали смежную информацию и координировали передачу данных между различными функциональными устройствами. Ранние настройки обеспечивают минимизацию кабельной обвязки и помещение нескольких или всех устройств в панель управления отсека, что экономит стоимость и занимаемое пространство. Для сложной структуры КРУЭ требуется ранняя фиксация технических данных по устройствам измерения тока и напряжения. Последующие изменения могут привести к существенному изменению компоновки КРУЭ.

### 6.6.1 Основные исходные данные пользователя

- Номинальные параметры трансформаторов тока и напряжения
- Число и место размещения трансформаторов напряжения
- Требования для характеристик переходных процессов ТТ и ТН
- Требуемый тип и количество входных/выходных сигналов, особенно если они не отвечают международным требованиям
- Связи от отсека к отсеку, особенно если планируется расширение
- Связи от отсека - к управлению станцией
  - к системам защиты
  - к системам измерения
  - к системам контроля
- Конструкция системы заземления

### 6.6.2 Основные исходные данные изготовителя

- Время срабатывания выключателя, разъединителя и заземлителей
- Давление разрыва
- Характеристики открытия устройства сброса давления
- Этапы подачи аварийного сигнала устройств контроля плотности газа
- Кривая намагничивания ТТ и характеристики переходных процессов, если требуются
- Качество и количество связей от основного оборудования к блоку управления отсеком
- Концепция экранирования кабельной обвязки
- Выходные сигналы, особенно если они не соответствуют международным правилам
- Специальные требования для системы заземления
- Время прожига

## 7 Здание / строительные работы / стальные конструкции / заземление

### 7.1 Здание и строительные работы

Коммутационное оборудование (высоковольтное и, если используется, среднего напряжения), вспомогательное оборудование (например, оборудование обслуживания станции, системы управления, защитное устройство), трансформаторы, кабели и воздушные линии формируют функциональный блок. В связи с этим специальная схема компонентов системы должна быть хорошо согласована заказчиком, архитектором и инженером-электриком. Необходимо учесть возможные последующие расширения не позднее стадии планирования строительных работ.

Изготовитель КРУЭ предоставляет пользователю или разработчику здания планы с техническими условиями на строительство, которые содержат всю информацию по параметрам строительных работ (внутренние размеры помещения, нагрузки, проницаемость стен и потолка и т.п.), относящихся к КРУЭ. Эти технические условия на строительство формируют основу для разработки строительных чертежей проектировщиком (или строительной фирмой). Перед началом строительства конструкционные чертежи должны быть подготовлены для изготовителя КРУЭ, который должен провести экспертизу соответствующих вопросов. Администрация местной строительной площадки отвечает за соблюдение утвержденных строительных чертежей рабочей площадки.

Строительные работы могут выполняться в диапазоне от простых наружных фундаментов и металлоконструкций в промышленных зонах до архитектурно сложных крупных зданий или сложных подземных выработок. Два примера приведены на Рис. 7.1 и Рис. 7.2.

Должны быть приняты следующие принципы планирования:

- Строительство

Помещения для электрических установок должны быть спроектированы таким образом, чтобы не могла проникать вода, а конденсация поддерживалась бы на минимальном уровне. Трубопроводы и другие средства не должны представлять опасность электрической системы, если они будут повреждены. Необходимо исключить стыки в пределах здания. В других отношениях пользователь должен определить возможные перемещения, и изготовитель должен последовательно принять меры, для того чтобы приспособиться к данному перемещению. В любом случае конструкционные колонны и стыки должны быть устроены таким образом, чтобы они согласовывались с полюсным расстоянием/разбиением отсека КРУЭ. Строительные конструкции (например, здание, фундаменты, контейнеры и т.п.) должны быть способны выдерживать ожидаемые механические нагрузки (статические и динамические), вызываемые установкой и эксплуатацией КРУЭ и связанных с ним соединений, включая вспомогательное оборудование, например, краны.

- Требования к пространству

Коридоры и пути доступа должны иметь адекватные размеры для эксплуатации и технического обслуживания коммутационной аппаратуры, а также для любой необходимой работы, которая должна быть выполнена для транспортировки и установки. Соответствующая минимальная ширина проходов и длина маршрутов эвакуации должны соответствовать региональным правилам. В дополнение к пространству, требующемуся для системы и оборудования, должно быть обеспечено соответствующее пространство для выполнения работ по вводу в эксплуатацию (например, работы по газовой системе, высоковольтные испытания) и инспекционные работы (например, разборка блока прерывателя).

- Грузоподъемное оборудование

Если для выполнения работ по установке, эксплуатации или ремонту требуется кран, необходимо обеспечить соответствующую высоту крюка крана и размеры подъездного пути. В коммутационных системах с большим количеством шин, пересекающих проходы, целесообразно будет использовать дистанционное управление краном.

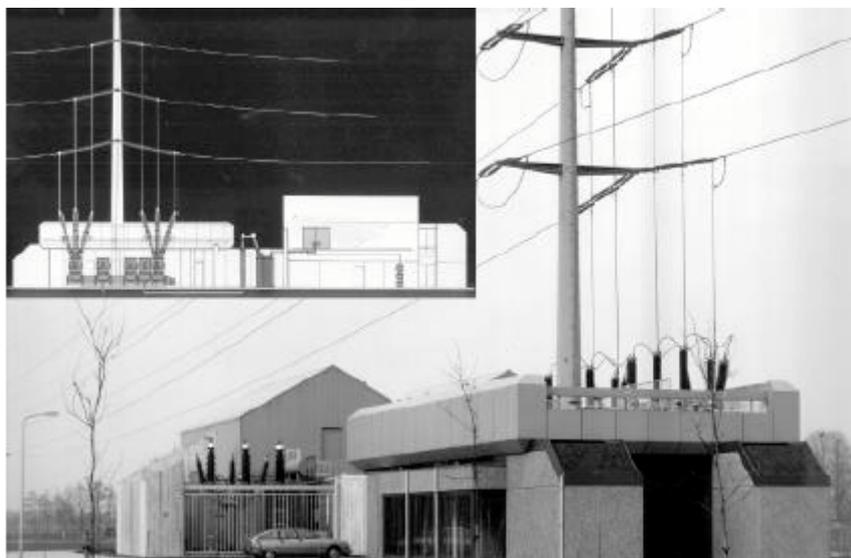


Рис. 7.1: Подстанция КРУЭ на 170 кВ с трансформатором и оборудованием среднего напряжения



Рис. 7.2: КРУЭ на 420 кВ

- Стены и потолки

В общем случае необходимо минимизировать образование пыли. Кроме этого, необходимо избегать отложений пыли; в связи с этим стены и потолки должны быть гладкими и простыми для очистки. Отверстия для шины с элегазовой изоляцией должны иметь герметичные уплотнения для обеспечения защиты от погодных условий и спроектированы таким образом, чтобы обеспечить механическое и тепловое перемещения.

- Окна и двери

Все высоковольтные коммутационные установки должны быть установлены в виде закрытых на ключ мест электрического сервиса. Окна должны иметь такую конструкцию, которая предотвращает вход снаружи. Для поставки КРУЭ требуются большие пути доступа. Такие пути доступа должны поддерживаться свободными во время эксплуатации при возникновении проблем, и если они требуются для расширения в будущем. Люки доступа должны быть оснащены предохранительными замками и табличками с надписями по технике безопасности. Двери должны открываться наружу. Должно быть обеспечена возможность открытия двери аварийного выхода изнутри без использования ключа. Необходимо рассмотреть дополнительные меры безопасности.

- Места монтажа КРУЭ

Полы должны быть горизонтальными, прочными и пригодными для всех статических и динамических нагрузок, и должны быть в пределах допусков. Допуски должны быть согласованы между пользователем и изготовителем. Покрытие пола должно обладать соответствующей способностью выдерживать давление и нагрузки, возникающие во время транспортировки компонентов коммутационной системы.

Используются следующие типы крепления:

- просверленный анкер;
- вмурованный анкер;
- анкерный рельс;
- стальной рельс для сварки;
- Охлаждение/нагрев и вентиляция.

Допустимые окружающие температуры должны быть обеспечены при помощи соответствующей вентиляции, принимая во внимание тепловое рассеяние КРУЭ (при необходимости, кондиционирование или подогрев воздуха). Предпочтительной является естественная вентиляция. Помещения, содержащие комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией, должны соответствующим образом вентилироваться. Должны выполняться соответствующие региональные

требования. Может быть выполнен фиксированный или мобильный блок отвода газов для обеспечения удаления продуктов разложения элегаза. Информация по контролю потенциального влияния элегаза на здоровье при его выбросе в атмосферу предоставлена в документе IEC 1634.

- Пожарная защита

Для самого КРУЭ не требуется специальных мер пожарной защиты. Тем не менее, между помещениями коммутационной аппаратуры и трансформаторами, а также между помещениями коммутационной аппаратуры и кабельными подвальными помещениями должны быть приняты соответствующие меры защиты. После установки потолок и стены должны быть герметизированы таким образом, чтобы полностью выполнялись технические требования к пожарной защите, применяемые к зданию. В случае пожара маршруты эвакуации, спасения и аварийные выходы должны быть пригодны к эксплуатации и не загорожены.

- Снижение шума

В зависимости от размещения для снижения шума для КРУЭ (из-за операций коммутации) и трансформаторов могут потребоваться дополнительные меры для здания.

- Кабели

Кабельные стойки или экранированные каналы подтвердили свою пригодность для установки кабелей управления. В случае силовых кабелей необходимо учитывать допустимый радиус изгиба и пространство, требующееся для соединения заделанных концов. Опасность распространения пламени и последующего загрязнения газом должна быть минимизирована за счет выбора соответствующих кабелей и зон разделения.

- Освещение и штепсельные розетки

Уровень освещения должен быть достаточен для нормальной эксплуатации. Для специальных работ может использоваться переносное освещение. Штепсельные розетки должны устанавливаться для электропитания специальных инструментов (наподобие установки для обращения с элегазом), а также для электропитания генератора для испытаний.

- Заземление

Заземление, защита от перенапряжения и меры по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) должны координироваться [[2]] (см. раздел 6.5). При разработке заземления и мер по защите от перенапряжения необходимо иметь в виду концепцию защитной зоны для ЭМС. Правильно спроектированная система заземления и выравнивание потенциала являются существенными для достижения этой цели. Также может быть использовано прямое соединение с арматурой здания.

## 7.2 Опорные конструкции и доступность

Многие компоненты КРУЭ являются самонесущими. Если в качестве опорных конструкций или с учетом сейсмических требований требуется использовать металлоконструкции, то их планирование и утверждение должны быть выполнены изготовителем КРУЭ. Это позволит избежать помех и проблем сопряжения во время установки.

Некоторые пользователи задают вопрос, допустим ли для операторов верхний уровень доступа к нормальным рабочим функциям; в общем случае это зависит от того, считается ли необходимым иметь смотровые окна.

Для обеспечения лучшего доступа также могут потребоваться передвижные платформы, и даже в том случае операторам может потребоваться перелезть через коммутационную аппаратуру для получения доступа ко всем частям. Доступ может также потребоваться к определенному специальному оборудованию для того, чтобы закрыть его на висячие замки. Кроме того, может потребоваться верхний доступ к местам заполнения газом (см. также раздел 12.3.2.2).

### **7.3 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем**

При условии, что пользователь или третья сторона отвечают за все строительные и монтажные работы с металлоконструкциями, изготовитель и пользователь должны обмениваться по крайней мере следующей информацией:

#### **7.3.1 Основные исходные данные пользователя**

- строительные чертежи здания
- допуски на уровень пола, конструкционные колонны и отверстия для кабелей, проходных изоляторов и т.п.
- возможные движения пола
- граничные условия для транспортировки и установки
- климатические условия в здании, особенно во время установки
- пределы поставки
- чертежи системы заземления

#### **7.3.2 Основные исходные данные пользователя**

- основные характеристики компоновки, включая детальные размеры КРУЭ
- размеры и масса самых больших и тяжелых поставляемых блоков
- размещение и размеры опорных конструкций
- при необходимости, требования к другим конструкциям, которые не являются частью поставки
- динамические и статические усилия в местах опор
- допуски на строительные работы, особенно допуски на высотные отметки мест установки КРУЭ
- требования к кабельным каналам и системе заземления
- требования к грузоподъемному устройству
- требования к пространству для проведению проверок и сборки на рабочей площадке
- требования к чистоте во время установки
- требуемые климатические условия в здании
- пределы поставки

## **8 Транспортировка и хранение**

### **8.1 Общая информация**

В данном процессе необходимо учитывать различные стороны, привлеченные к транспортировке оборудования между заводом-изготовителем и окончательной рабочей площадкой пользователя. Они включают в себя:

изготовителя, основного подрядчика, транспортного агента/транспортные компании, складского оператора, страховые компании, таможенных агентов/маклеров, региональных подрядчиков/судоходные компании и конечного пользователя, каждый из которых имеет различный численный состав, ограничения, приоритеты и специализацию. Слабость какой-либо из этих сторон может повлиять на качество и время окончательной поставки изделия.

При оценке времени выполнения установки по проекту необходимо использовать реалистичные ожидаемые величины для прогнозирования времени, требуемого для международных перевозок и таможенной очистки, так чтобы в процессе заказа можно было назначить достаточное время его выполнения.

### **8.2 Технический анализ**

В общем случае оптимальный метод поставки поставщика приобретает окончательную форму в процессе разработки каждой новой производственной линии. Обычно он

представляет собой компромиссное решение между подстанцией, полностью собранной и испытанной на заводе и ограничениями транспортировки и погрузочно-разгрузочных операций. В пределах этих нормативов изготовитель подгоняет каждое решение по транспортировке для обеспечения безопасного прибытия его изделий на площадку пользователя с учетом следующего:

- региональных правил по транспортировке элегаза в сосудах под давлением,
- мер безопасности для чувствительных компонентов (например, измерительного трансформатора, панелей защиты и управления) для учета возможного небрежного обращения или транспортировки по бездорожью,
- необходимости датчиков для мониторинга (например, вибрации, ударов и влажности), обычно в соответствии с региональными условиями,
- максимальных транспортировочных размеров и весов, ограничиваемых грузоподъемными средствами,
- допуска, требуемого во время периода хранения для проверок или включения обогревателей.

Для обеспечения того что методы упаковки будут соответствующими и рентабельными, требуются ясные и точные инструкции для пользователя, которому наиболее хорошо известны региональные условия. Специальные требования к упаковке (например, антикоррозионные средства или упаковка с повторным уплотнением) могут увеличить дополнительные расходы, которые должны быть проверены с учетом особых региональных условий.

Окончательное решение по методу поставки обычно принимается на основе экономических соображений с учетом имеющегося времени и окончательного расположения рабочей площадки. Любое изменение метода поставки может повлиять на требования (в большей или меньшей степени) и решение по нему должно быть принято на ранней стадии процесса выполнения работ. Возможные решения по требованию заказчика включают в себя следующее:

- заводская установка в контейнер (в тех случаях, когда это практично) может обеспечить дополнительную защиту от повреждений и потерь с возможной чистой экономией на упаковке. Тем не менее, следует учитывать сложности при грузоподъемных операциях и скрытое повреждение, при котором трудно определить ответственность за него;
- специально предназначенный транспорт (например, прямой автомобильный или железнодорожный) обеспечивает преимущества одного перевозчика и «единичную» ответственность при возможной экономии времени;
- существенную экономию времени можно достичь при авиаперевозках. Однако такой вариант с учетом его высокой стоимости оправдан только в критических ситуациях;
- частичные поставки могут обеспечить разрешение затруднений графика выполнения проекта и его материально-технического обеспечения за счет поставки компонентов строго по графику с учетом производственных возможностей, ограниченных региональных возможностей по грузоподъемным операциями и последовательности установки. При частичных поставках также имеется возможность компенсировать задержки в заказе или изготовлении. Тем не менее, должно быть предусмотрено обеспечение нескольких поставок, которое включается в исходную контрактную документацию.

### **8.3 Страхование поставки, таможенные пошлины и расходы**

Во время процесса выдачи заказа должно быть установлено четкое разделение ответственности за расходы и поставки. В международных стандартах (например, ИНКОТЕРМ) предлагаются четкие определения всех вариантов для выполнения специальных запросов пользователя. Необходимо избегать перекрытия ответственности или незакрытых мест и в каждом месте сопряжения ответственности обе стороны должны проверять состояние изделий. Обмен всей соответствующей документацией, которая определяется контрактом (например, упаковочными листами)

и требуется для таможенной очистки изделий, должен производиться между всеми сторонами правильно и своевременно.

#### **8.4 Получение груза**

Региональный конечный пользователь или подрядчик, ответственный за выгрузку оборудования на площадке, должен заранее получить технические условия на поставку для обеспечения соответствующего грузоподъемного оборудования и его использования в соответствии с назначением.

Поскольку четкое разделение обязанностей обычно происходит как только изделия прибывают на склад конечных пользователей или на рабочую площадку, то строго рекомендуется инспекция изделий с точки зрения потерь или повреждений. Герметичные корпуса или компоненты должны проверяться для обеспечения их целостности после этой или более ранней проверки (например, таможенной). Предпочтительно, чтобы эта проверка по прибытии изделий проходила под контролем представителя изготовителя и служила двойной цели: дать конечному пользователю возможность также подтвердить состояние упаковки в том случае, когда предусмотрено дополнительное время хранения из-за возникших задержек.

#### **8.5 Хранение**

Используемый метод хранения (т.е. внутри помещения, вне помещения, в закрытом состоянии, с обогревом и т.п.) должен согласовываться с методом хранения, заданным пользователем и обеспечиваемым изготовителем. В случае длительного хранения оборудование не должно быть забыто и в соответствии с рекомендациями изготовителя должны выполняться периодические проверки.

Временное хранение КРУЭ на рабочей площадке до начала монтажа должно быть дополнительным к методам упаковки, используемым для корпусов оборудования. В большинстве случаев предпочтительны некоторые типы защиты из элементов. Если предусмотрено длительное время хранения, то должны быть предприняты дополнительные меры защиты для обеспечения окружающих условий упакованных компонентов. Это может означать только закрытое хранение герметичных оболочек или распаковка и хранение в обогреваемом здании панелей управления и защиты. Фактические компоненты КРУЭ должны транспортироваться и храниться в зоне установки логичным образом, способствующим последовательности установки.

#### **8.6 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем**

##### **8.6.1 Основные исходные данные пользователя**

- Максимально допустимые транспортные размеры и массы.
- Ограничения доступа на рабочей площадке (двери, проходы).
- Ограничения по массе на рабочей площадке (полы, рампы, подъемное оборудование и т.п.).
- Наличие на рабочей площадке грузоподъемного оборудования.
- Планируемая длительность хранения и окружающие условия, преобладающие в зоне хранения.
- Ограничения, связанные с поставкой оборудования под давлением и контейнерами с элегазом.

##### **8.6.2 Основные исходные данные изготовителя**

- Тип газа и давление газа для транспортировки
- Инструкции по транспортировке, подъему и перемещению компонентов КРУЭ
- Максимальный размер и масса по транспортной накладной для поставляемых компонентов
- Условия краткосрочного и долгосрочного хранения и инструкции по компонентам КРУЭ, запасным частям и оборудованию для технического обслуживания

- Инструкции по периодической проверке хранящихся деталей

## **9 Монтаж и ввод в эксплуатацию распределительных устройств**

### **9.1 Общая информация**

Монтаж КРУЭ на рабочей площадке должен рассматриваться в качестве дополнения процесса изготовления, использующего тот же самый уровень стандартов качества для обеспечения того, что окончательно собранное КРУЭ отвечает критериям, для которых оно было спроектировано. Какие-либо «сокращения» в данном процессе могут повлечь отрицательные последствия для надежности конечного изделия.

Во время монтажа КРУЭ конечный пользователь и персонал имеют возможность принять участие в установке и/или присутствовать на всех ее этапах. Это должно поощряться, поскольку обеспечивает уверенность и обучение эксплуатации оборудования, которое будет сложно повторить после того, как специалисты по установке покинут рабочую площадку.

### **9.2 Подготовка рабочей площадки**

Независимо от внутренней или наружной установки перед началом монтажа должны быть готовы платформа или здание КРУЭ и все приготовления на месте. Календарное планирование выполнения проекта должно обеспечить, чтобы несоответствующие задачи (например, изменения строительных работ) не были запланированы в период установки. Ключевым является обеспечение чистоты. Долговременная надежность конечного изделия в большой степени зависит от уровня чистоты, поддерживаемой во время процесса монтажа. Его можно достичь обеспечением определенной чистой рабочей зоны. Должны быть предприняты следующие дополнительные меры подготовки:

- Изготовитель должен задать все региональные ограничения по рабочим условиям, которые должны использоваться для монтажа КРУЭ во избежание загрязнения частицами, пылью, водой или льдом. Для достижения этих условий могут потребоваться временные меры в виде укрытий, барьеров или обогревателей, особенно во время установки вне помещения.
- Сторона, ответственная за монтаж КРУЭ на рабочей площадке, должна обеспечить наличие монтажных инструментов и принадлежностей, оговоренных в контракте (например, грузоподъемного оборудования, инструментов и электропитания) во время всего периода установки.
- Изготовитель должен задать число и квалификацию персонала, необходимого для выполнения монтажа.
- Фундамент (пол) должен быть очищен для обеспечения расположения КРУЭ и уплотнен бетоном для предотвращения образования ненужной пыли.
- Распаковка и общая очистка (при необходимости) компонентов должны проводиться вне чистой зоны сборки.

### **9.3 Подготовка рабочей бригады**

Строго рекомендуется, чтобы КРУЭ устанавливалось под контролем изготовителя. Если фактический монтаж производится третьей стороной, то существенно, чтобы эта сторона обладала основными знаниями, относящимися к процедурам сборки и стандартам качества. Этого можно достичь следующим образом:

- До начала установки бригада проходит соответствующее обучение по стандартам качества, применимым к тем задачам, которые должны быть выполнены. Это обучение должно «обновляться» с регулярными интервалами во время процесса установки.
- Выдаются четкие инструкции, особенно в случае использования второго языка.
- Должна быть в наличии соответствующая документация по монтажу.

- В наличии имеется соответствующий инструмент, принадлежности и спецодежда, и имеется представление по их правильному использованию.
- Все монтажные работы, для которых требуется непосредственный контроль, согласованы между всеми сторонами.

#### 9.4 Монтаж новых КРУЭ

Весь процесс установки КРУЭ может занимать несколько месяцев, в течение которых должны продолжаться другие работы, связанные с данным проектом. Необходима координация работ среди всех сторон, ответственных за проект, особенно по месту сопряжения высоковольтного трансформатора и высоковольтных кабельных соединений.

Время, потраченное на такой процесс координации, поможет обеспечить минимальное количество нарушений во время процесса монтажа. Тем не менее, нарушения будут происходить и необходимо обеспечить определенную степень гибкости в участии всех сторон.

Специальные процедуры монтажа разрабатываются для обеспечения каждого требования изготовителя КРУЭ. Тем не менее, типичной последовательностью монтажа нового КРУЭ может быть следующая:

- устанавливается анкерная/опорная система и выравнивается для приспособления к допускам строительных работ;
- комплектные отсеки и однофазные или трехфазные компоненты отсека устанавливаются на их соответствующих опорах;
- устанавливаются межотсекковые соединительные элементы и соединяются шинопроводы;
- устанавливаются вспомогательные панели управления и соединительные кабели;
- начинается процесс вакуумирования и заполнения элегазом;
- устанавливаются шинопроводы, включая проходные изоляторы элегаз/воздух к выходным трансформаторам или линейным положениям;
- устанавливаются компоненты интерфейса (например, КРУЭ к высоковольтному кабелю или силовым трансформаторам), но при этом шинопроводы остаются отсоединенными;
- выполняются испытания по вводу площадки в эксплуатацию, включая местное управление;
- КРУЭ подвергается высоковольтным испытаниям изоляции (См. Гл. 10).
- устанавливаются вспомогательные устройства КРУЭ (например, трансформаторы напряжения и грозозащитные разрядники) и подсоединяются шинопроводы к высоковольтным кабелям и/или трансформаторам.

Для ускорения общей программы некоторые задачи могут выполняться параллельно, если это соответствует общему стандарту монтажных работ.

#### 9.5 Монтаж дополнительного оборудования КРУЭ

Установка дополнительного оборудования на существующей подстанции КРУЭ предусматривает для изготовителя и оператора электростанции особые условия, выполнять которые обычно нет необходимости при установке новых КРУЭ.

Ниже приведены эти специальные условия или ограничения, но они могут не ограничиваться только этим:

- меры, предусмотренные в существующей подстанции для будущих расширений (см. Гл. 3).
- необходимость поддерживать в рабочем состоянии всю существующую электростанцию или ее часть (См. Гл. 12).
- безопасность, относящаяся к эксплуатируемому основному и вспомогательному оборудованию (см. главы 6 и 12)
- высоковольтные испытания изоляции выполненной установки дополнительного

оборудования (см. главу 10).

Не существует стандартной последовательности монтажа, связанной с установкой дополнительного оборудования подстанции КРУЭ. Каждый случай должен быть отдельно рассмотрен изготовителем, который может сказать, что должно быть выполнено, и пользователем, который должен сообщить, каким образом это может быть достигнуто с минимальным прерыванием работы существующей работающей электростанции.

Во время процесса установки дополнительного оборудования конечный пользователь и оператор электростанции должны играть активную роль в обеспечении соответствия рабочих методик подрядчика, выполняющего монтаж, минимальным стандартам безопасности, применимым к этим рабочим методикам.

## **9.6 Ввод в эксплуатацию**

Ввод КРУЭ в эксплуатацию, включая проведение всех необходимых испытаний (см. главу 10 и Приложение А), представляет собой окончательную стадию программы обеспечения качества изготовителя до того, как КРУЭ будет включено в сеть пользователя. Процедуры, определенные для этой стадии, предназначены как дополнительные к общей программе обеспечения качества изготовителя и они не должны заменять или дублировать проверки, которые были выполнены на предыдущих стадиях.

### **9.6.1 Ввод в эксплуатацию основного оборудования**

Процедуры и испытания, рекомендованные изготовителем для основных компонентов, предназначены для подтверждения того, что интерфейсы между компонентами, собранными на заводе, были собраны на рабочей площадке без ошибок или внесения дефектов.

Специальное внимание должно быть уделено высоковольтным испытаниям изоляции переменным током. В качестве основы для переговоров между пользователем и изготовителем для установления процедур испытания изоляции на рабочей площадке, которые должны применяться для выполненного КРУЭ, необходимо использовать рекомендации, приведенные в документе IEC 517 и Приложении А к данному руководству. Информацию, относящуюся к вводу в эксплуатацию и испытаниям на рабочей площадке, см. также в главе 10.

### **9.6.2 Ввод в эксплуатацию вспомогательного оборудования**

Поскольку вспомогательное оборудование управления и защиты, связанное с укомплектованной подстанцией, обычно встраивается в КРУЭ только во время сборки на рабочей площадке, необходимо подтвердить следующее:

- соединительные провода и кабели между КРУЭ и панелями установлены аккуратно и надежно;
- все рабочие и сигнальные функции корректны как в дистанционном, так и в местном режиме;
- основные принципы управления отсека отсеком предварительно испытаны на заводе-изготовителе и отвечают требованиям управления эксплуатацией укомплектованной станции и логическим требованиям.

### **9.6.3 Ввод в эксплуатацию элегазовой изоляционной среды**

После завершения установки КРУЭ в большинстве случаев перед введением элегаза производится обработка газового отсека КРУЭ. Исключением из этого правила могут быть газовые отсеки, собранные на заводе, которые могут быть поставлены целиком и для которых не требуется дополнительного вмешательства во время процесса сборки на рабочей площадке (например, трансформаторы напряжения и силовые выключатели).

Настройки и проверки такой обработки должны включать в себя следующее:

- подтверждение герметичности каждого газового отсека во время цикла

- вакуумирования и после окончательного заполнения элегазом;
- подтверждение того, что окончательное содержание влаги в элегазе находится в рекомендованных пределах.

## 9.7 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем

### 9.7.1 Основные исходные данные пользователя

- Ограничения доступа на локальную рабочую площадку.
- Локальные рабочие условия и какие-либо ограничения, которые могут применяться (например, защитное оборудование, нормальные рабочие часы, профсоюзные требования для инспектора, монтажная бригада изготовителя и местная монтажная бригада и т.п.).
- Наличие и технические параметры грузоподъемного и транспортного оборудования.
- Наличие, количество и опыт местного персонала.
- Специальные правила для сосудов, работающих под давлением, и процедуры, которые могут использоваться во время монтажа и приемосдаточных испытаний.
- Интерфейсные требования для высоковольтных кабелей и трансформаторов.
- В случае расширения существующего КРУЭ:
  - имеющиеся средства для расширения в пределах существующего основного и вспомогательного оборудования;
  - условия в процессе обслуживания или эксплуатационные ограничения, которые должны приниматься во внимание;
  - правила техники безопасности, которых необходимо придерживаться.

### 9.7.2 Основные исходные данные изготовителя

- Пространство, необходимое для монтажа и сборки
- Размер и масса компонентов КРУЭ и испытательного оборудования
- Условия рабочей площадки по чистоте и температуре для чистого монтажа и зоны подготовки
- Число и опыт местного персонала, требуемого для монтажа
- Календарные планы-графики работ для монтажа и сдачи в эксплуатацию
- Электропитание, освещение, водоснабжение и другие потребности для монтажа и сдачи в эксплуатацию
- Предлагаемое обучение монтажного и обслуживающего персонала
- В случае расширения существующего КРУЭ:
  - требования к недействующим существующим компонентам, связанные с планом-графиком монтажа
  - правила техники безопасности

## 10 Испытания

В международных стандартах заданы требования и определены номинальные параметры и испытания комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией в металлической оболочке и их отдельных компонентов. Применяемые стандарты МЭК определены ниже в таблице (многие из этих стандартов пересматриваются. Необходимо использовать последние издания):

<b>IEC 694</b>	Общие положения или стандарты на высоковольтную коммутационную аппаратуру и аппаратуру управления
<b>IEC 517</b>	Комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией в металлической оболочке на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше
<b>IEC 56</b>	Высоковольтные выключатели переменного тока
<b>IEC 44</b>	Измерительные трансформаторы

	Часть 1: Трансформаторы тока Часть 2: Трансформаторы напряжения Часть 3: Комбинированные трансформаторы Часть 4: Измерение частичных разрядов Часть 6: Требования к защитным трансформаторам тока для характеристики переходного процесса
<b>IEC 71</b>	Координация изоляции Часть 1: Определения, принципы и правила Часть 2: Руководство по использованию Часть 3: Координация междуфазной изоляцией. Принципы, правила и руководство по применению
<b>IEC 99</b>	Разрядники для защиты от атмосферных перенапряжений Часть 4: Металлоксидные разрядники для защиты от атмосферных перенапряжений без зазоров для систем переменного тока
<b>IEC 129</b>	Разъединители переменного тока (развязки) и заземлители
<b>IEC 137</b>	Проходные изоляторы для напряжения переменного тока свыше 1000 В
<b>IEC 185</b>	Трансформаторы тока
<b>IEC 186</b>	Трансформаторы напряжения
<b>IEC 270</b>	Измерения частичного разряда
<b>IEC 376</b>	Технические условия и приемка нового гексафторида серы
<b>IEC 480</b>	Руководство по проверке гексафторида серы (элегаза), отобранного из электрического оборудования
<b>IEC 815</b>	Руководство по выбору изоляторов для загрязненных сред
<b>IEC 859</b>	Кабельные соединения для комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией в металлической оболочке на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше
<b>IEC 1128<sup>1</sup></b>	Разъединители переменного тока – Переключение тока, передаваемого по шине, при помощи разъединителей
<b>IEC 1129<sup>2</sup></b>	Заземлители переменного тока – коммутация индуцированного тока
<b>IEC 1259<sup>3</sup></b>	Комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией в металлической оболочке на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше – требования по коммутации токов зарядки шины при помощи разъединителей
<b>IEC 1634</b>	Высоковольтная коммутационная аппаратура и аппаратура управления – использование и обращение с гексафторидом серы (элегазом) в высоковольтной коммутационной аппаратуре и аппаратуре управления
<b>IEC 1639</b>	Непосредственное соединение между КРУЭ и силовым трансформатором на номинальное напряжение 72,5 кВ и выше

<sup>1</sup> применяется в случае, когда используется схема с двойной системой шин

<sup>2</sup> применяется для заземлителей в случае нескольких конфигураций

<sup>3</sup> применяется для всех разъединителей при работе на КРУЭ

В документе IEC 517 установлены правила по выбору размеров оболочек, однако необходимо также учитывать требования к сосудам, работающим под давлением, существующие в различных странах, если они законодательно утверждены. Например, европейские стандарты, утвержденные CENELEC (Европейским комитетом по электротехнической стандартизации), которые перечислены в таблице ниже:

<b>EN 50052</b>	Оболочки из литейного алюминиевого сплава для газонаполненных высоковольтных комплектных распределительных устройств и аппаратуры управления
<b>EN 50064</b>	Оболочки из штампованного алюминия и алюминиевого сплава для газонаполненных высоковольтных комплектных распределительных устройств и аппаратуры управления
<b>EN 50068</b>	Оболочки из штампованной стали для газонаполненных высоковольтных комплектных распределительных устройств и аппаратуры управления
<b>EN 50069</b>	Сварные составные оболочки из литевых и штампованных алюминиевых

	сплавов для газонаполненных высоковольтных комплектных распределительных устройств и аппаратуры управления
<b>EN 50089</b>	Перегородки из литевой смолы для газонаполненных высоковольтных комплектных распределительных устройств и аппаратуры управления в металлической оболочке
<b>EN 50062</b>	Керамические полые изоляторы под давлением для высоковольтных комплектных распределительных устройств и аппаратуры управления

Данные стандарты определяют три типа испытаний комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией:

- типовые испытания
- стандартные испытания (должны проводиться, когда это практично, на заводе-изготовителе)
- испытания на рабочей площадке после монтажа (часть стандартных испытаний по стандартам МЭК).

### 10.1 Типовые испытания

Типовые испытания проводятся с целью проверки характеристик комплектного распределительного устройства и аппаратуры управления, их приводов и вспомогательного оборудования. Они должны выполняться на данной конструкции для обеспечения соответствия требованиям стандарта.

Изготовитель должен быть способен продемонстрировать отчетами или сертификатами испытаний, что все типовые испытания были проведены для сборочных узлов той же самой конструкции, поставленной заказчику. Типовые испытания не являются частью системы обеспечения качества для каждой поставляемой партии изделий и должны проводиться только один раз для данной конструкции.

### 10.2 Стандартные испытания

Стандартные испытания являются неотъемлемой частью процесса обеспечения качества. Они выполняются во время изготовления каждой позиции оборудования с целью выявления дефектов материала или конструкции. Приемные испытания, если они требуются заказчиком, должны быть частью стандартных испытаний. Поскольку приемные испытания не определены в стандартах, то критерии приемки с допусками должны быть установлены изготовителем перед стандартными испытаниями для того, чтобы их мог проверить заказчик.

### 10.3 Испытания после монтажа на рабочей площадке

Испытания после монтажа на рабочей площадке выполняются для выявления возможного повреждения, полученного при транспортировке, хранении, воздействии окружающей среды или окончательной сборки. Важно обратить внимание на то, что испытание на рабочей площадке не является репетицией ни типовых, ни стандартных испытаний. Их целью является проверка целостности системы перед включением электропитания. Они являются последним этапом процесса управления и обеспечения качества.

Рекомендации, а также технические и практические соображения по испытаниям на рабочей площадке приведены в главе 7 и приложении СС документа IEC 517. Особое внимание необходимо обратить на испытания изоляции на электрическую прочность. В то время как другие испытания могут быть проведены достаточно легко и для них не требуется дорогостоящего испытательного оборудования, при испытаниях изоляции на диэлектрическую прочность могут возникнуть следующие проблемы:

- должна быть выбрана оптимальная процедура испытаний,
- реальная возможность проведения испытаний,
- стоимость испытаний.

Примеры различных испытательных установок показаны на Рис. 10.1 и 10.2. На Рис. 10.1 показана цепь резонансных испытаний, где напряжение прикладывается к КРУЭ

при помощи воздушного проходного изолятора. На Рис. 10.2 показан испытательный трансформатор, подключенный напрямую к КРУЭ.

В настоящее время в стандартах ЕС рекомендуется проведение в основном электрических испытаний (на переменном токе или импульсные электрические испытания). Разработаны новые методы с использованием обнаружения частичного разряда с нестандартными системами детектирования (например, акустическими или СВЧ). В этом отношении многие пользователи и изготовители используют процедуры испытаний (которые должны быть заранее согласованы), основанные на собственном опыте. Дальнейшую информацию по существующим процедурам испытаний см. в Приложении А.



Рис. 10.2: Испытательный трансформатор с элегазовой изоляцией и разделительный конденсатор для измерения ЧР, подключенные напрямую к КРУЭ

Рис. 10.1: Цепь резонансного испытания, подключенная к КРУЭ через проходной изолятор элегаз/воздух

## 10.4 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем

### 10.4.1 Основные исходные данные пользователя

- Запрос на проведение испытаний на заводе-изготовителе или присутствие на стандартных испытаниях
- Требования к объему испытательного оборудования, представляемого изготовителем
- Требования к процедурам испытаний на рабочей площадке (в основном испытания изоляции на электрическую прочность)
- Информация по оборудованию, подключенному к КРУЭ во время испытаний изоляции на электрическую прочность (например, кабелей или напрямую подсоединенным трансформаторам или реакторам)
- Доступность и требования к пространству на рабочей площадке для испытательного оборудования
- Доступность на рабочей площадке грузоподъемного и транспортного оборудования

### 10.4.2 Основные исходные данные изготовителя

- Обеспечение соответствующих документов для типовых и стандартных испытаний

- Рекомендации и меры для процедур испытаний на рабочей площадке
- Доступность и требования к пространству на рабочей площадке для испытательного оборудования
- Меры для испытаний кабеля постоянным током (например, допустимое испытательное напряжение постоянного тока)
- Меры по непосредственному соединению трансформаторов и реакторов
- Объем поставки

## 11 Элегаз и процедуры обращения с ним

Элегаз и процедуры обращения с ним являются темой нескольких публикаций. Наиболее известными являются руководства МЭК 376 (для нового газа), 480 (для использованного газа) и 1634 (для использования элегаза в высоковольтном КРУЭ). В публикациях в журнале ELECTRA в июне/августе 1991 г., феврале 1996 г. и августе 1997 г., соответственно, обсуждается обращение с элегазом и продуктами его разложения [17], элегаз и глобальная атмосфера [11], и руководство по повторному использованию элегаза [18], где дана исчерпывающая информация по всем вопросам, связанным с элегазом и процедурам обращения с ним.

### 11.1 Повторное использование элегаза

Элегаз был определен как газ, приводящий к парниковому эффекту с длительным временем жизни в атмосфере. В упомянутых выше статьях рекомендовано минимизировать выброс элегаза, избегая утечек при помощи правильно спроектированного КРУЭ и систематичного повторного использования при всех возможных обстоятельствах. Преимуществами данного подхода являются следующие:

- соответствие основной государственной политике по исключению выброса искусственных газов в окружающую среду;
- сохранение дорогостоящего вещества;
- демонстрация добровольных усилий по снижению выбросов при отсутствии официальных правил, утвержденных властями.

Минимизация потерь от утечек из оборудования в прошлом была основной проблемой. Разработка оборудования с элегазовой изоляцией привела к уровню утечек 0,1% в год. Для успешного обращения с элегазом и его повторного использования требуется следующее:

- электрооборудование, спроектированное для простого повторного использования;
- соответствующие процедуры обращения с газом и его повторного использования;
- соответствующее оборудование для обращения с газом и его повторного использования;
- знание происхождения и количества загрязняющих веществ, которые ожидаются в элегазе, используемом в электрооборудовании;
- стандарты чистоты для элегаза, который должен повторно использоваться в электрооборудовании;
- методы проверки качества очищенного газа;
- концепция утилизации, по которой элегаз может быть преобразован в вещества, совместимые с окружающей средой.

Эти вопросы описаны в «Руководстве по повторному использованию элегаза» [18], включая следующее:

- идентификацию происхождения образующихся загрязняющих веществ;
- описание отрицательного влияния загрязняющих веществ;
- уровни чистоты и методы проверки повторно используемого элегаза, на основе функциональных ограничений;
- описание процедур повторного использования элегаза и имеющегося оборудования.

Для поддержания элегаза в состоянии повторного использования может

использоваться контроль газа и оборудование для очистки с учетом различных уровней загрязнения (свежий газ – газ, не подвергавшийся воздействию электрической дуги, газ, подвергавшийся нормальному воздействию электрической дуги, и газ, подвергавшийся сильному воздействию электрической дуги, принципы которого показаны на Рис. 11.1. Более подробную информацию см. в [18].

Для того чтобы весь персонал был осведомлен о необходимости правильного использования процедуры обращения с элегазом, настоятельно рекомендуется разместить Положение об охране окружающей среды для использования элегаза (которое представлено в Приложении В) на всех подстанциях, оснащенных комплектными распределительными устройствами с элегазовой изоляцией.

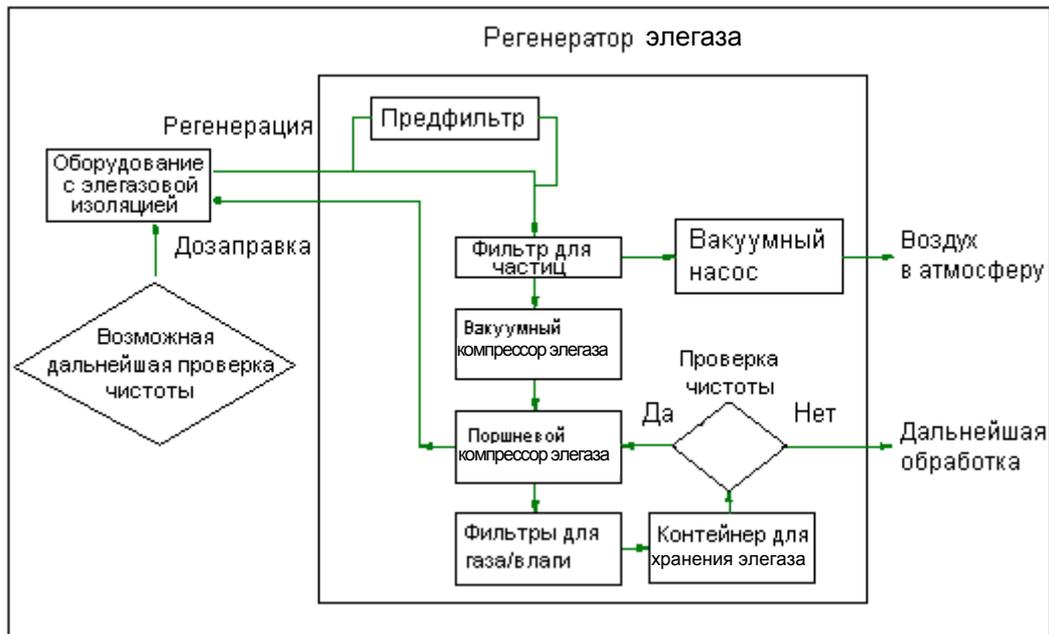


Рис. 11.1: Основная функциональная схема регенератора элегаза.

## 11.2 Обращение с продуктами разложения элегаза

Несмотря на то, что в чистой форме элегаз является нетоксичным газом, он может после выпуска из высоковольтного оборудования содержать токсичные продукты разложения. Эти продукты генерируются высокими температурами, которые характерны для случаев гашения дуги и внутренних пробоев. Большинство из разложившихся молекул будут снова рекомбинировать в элегаз. Будут сохраняться некоторые остаточные продукты в форме токсичной и едкой серы, фтора, кислорода и соединений металла (гидролизующихся фторидов (HF)).

Такие загрязнения, как вода, воздух и масло, могут попадать в отсеки в результате проникновения через уплотнения, неправильной работы по дозаправке, неполному функционированию внутренних фильтров, использования компрессоров с гидроредукцией и т.п.

Фильтры, установленные в оборудовании, при нормальных условиях будут ограничивать количество продуктов разложения элегаза. В настоящее время существующее серийно выпускаемое оборудование дает возможность пользователям проверять качество газа с регулярными интервалами. Пределы и тип загрязнений, а также методы измерения описаны в упомянутых выше руководствах.

В случае неприемлемого уровня загрязнений (воды, воздуха, гидролизующихся фторидов, масла,  $CF_4$ ) имеется оборудование для обращения с газом с различными возможностями регенерации газа для того, чтобы пополнять отсек комплектного распределительного устройства газом приемлемого качества. В дополнение к этим операциям «очистки» манипулирование с газом также необходимо в тех случаях, когда высоковольтное оборудование нужно вскрывать для проведения технического обслуживания.

Водород, газообразные продукты разложения и фториды металла поглощаются молекулярными ситами и активированными фильтрами из окиси алюминия, которые обычно встраиваются внутри оборудования для обращения с газом. В случае неприемлемого уровня воздуха и/или масла наилучшим решением будет обращение к изготовителю КРУЭ или производителю элегаза для того, чтобы получить рекомендации по сбросу или регенерации газа. Загрязненный материал фильтра и использованная защитная одежда и т.п. должны транспортироваться на установки переработки отходов, где они будут нейтрализованы или сожжены. Настоятельно рекомендуется регенерировать газ во всех возможных ситуациях для максимально возможного повторного его использования. На Рис. 11.2 показана стандартная процедура проверки качества газа.

При работе с загрязненным веществом необходимо принимать специальные меры предосторожности. Персонал должен быть хорошо обучен и проинформирован; необходимо надевать защитную одежду и противогазы или респираторы с фильтрами с активированным углем.

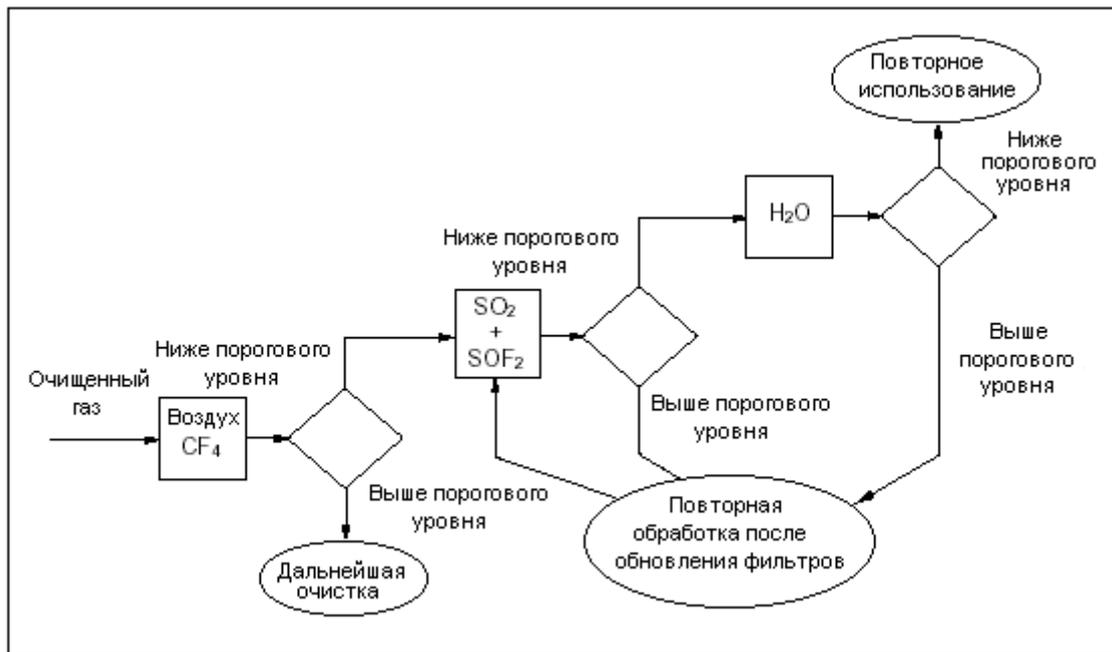


Рис. 11.2: Стандартная процедура проверки качества газа

Максимальная защита обеспечивается при откачке газа из отсека и его дозаправке воздухом или азотом перед открытием. После этой процедуры газообразные продукты разложения будут удалены и защита будет необходима только от пыли, содержащей молекулы фторида металла. Этот порошок должен удаляться при помощи специального пылесоса, оснащенного высокоэффективными выхлопными фильтрами.

Если необходимо войти в отсек, то необходимо принять меры, чтобы туда подавалось достаточное количество свежего воздуха.

### 11.3 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем

#### 11.3.1 Основные исходные данные пользователя

Исходные данные пользователя должны как минимум включать в себя следующее:

- имеющееся измерительное оборудование;
- имеющееся оборудование для обращения с газом и его хранения;
- имеющиеся принадлежности;
- тип соединительного штуцера трубопроводов элегаза;

### 11.3.2 Основные исходные данные изготовителя

Исходные данные изготовителя должны, как минимум, включать в себя следующее:

- информацию по газовой изолированности комплектного распределительного устройства и требуемое количество элегаза для заправки до номинального давления;
- номинальные параметры газовой системы;
- максимально допустимые уровни загрязнений элегаза перед заполнением;
- максимально допустимые уровни загрязнений элегаза во время эксплуатации;
- рекомендуемые принадлежности для обращения с газом, хранения, измерений и защиты персонала, включая рекомендуемые технические условия;
- руководства для обращения с элегазом, процедуры регенерации и процедуры измерения на рабочей площадке;
- условия для транспортировки и хранения.

## 12 Вопросы технического обслуживания

В общем случае основные вопросы технического обслуживания, которые влияют на конструкцию КРУЭ на ранних стадиях планирования КРУЭ, являются теми же самыми, которые описаны в главе 3, и аналогичны вопросам, связанным с КРУВ.

Они относятся к следующему:

- a) требования к эксплуатационной гибкости;
- b) требования к безопасности системы (стратегическая важность подстанции);
- c) требования по надежности и работоспособности (ожидаемые плановые и внеплановые перерывы в работе и их влияние на длительность простоя подстанции).

Эти вопросы непосредственно влияют на все аспекты, описанные в данном руководстве, и содержатся в других главах. Целью данной главы является выделить некоторые позиции, которым в подстанциях КРУЭ должно быть уделено специальное внимание или которые не упоминаются в других главах.

### 12.1 Типы технического обслуживания

Технические условия и/или руководства, подготовленные изготовителем, должны включать в себя по крайней мере следующие требования к техническому обслуживанию:

- a) для условий эксплуатации (см. раздел 3.1.3)
- b) для условий средств контроля и диагностики (см. разделы 6.2 и 6.3)
- c) объем работ, продолжительность, простой и отключение электропитания, требуемые для различных типов технического обслуживания (см. ниже)
- d) условия технического обслуживания (климатические условия, наличие грузоподъемных механизмов и приводов, запасных частей, специальных инструментов и принадлежностей, и т.п.).

Обычно изготовители рекомендуют два основных типа технического обслуживания:

- a) инспекция – выполняется с частыми (задаваемыми) интервалами и включает в себя проверки (по каким-либо аномальным индикациям) без необходимости перерыва в работе;
- b) плановое техническое обслуживание, которое обычно состоит из следующего:
  - стандартное плановое техническое обслуживание – выполняется регулярно с интервалами от 5 до 10 лет, если не превышено предельное число операций коммутации В-О и/или совокупная величина коммутируемой энергии. Сюда входит работа, которая не требует вскрытия (разборки) оболочек;
  - техническое обслуживание с капитальным ремонтом – выполняется с интервалами 20 лет или более, либо при накоплении допустимой величины операций коммутации, и включает в себя вскрытие некоторых газовых отсеков (разборку).

В последнее время появилась тенденция выполнять техническое обслуживание на основе состояния системы и/или техническое обслуживание, направленное на надежность, которые аналогичны плановому техническому обслуживанию, но включают в себя работы, которые основаны на информации, получаемой от оборудования контроля, которое прогнозирует необходимость выполнения технического обслуживания (нежели чем обслуживание, основанное на времени эксплуатации или количестве операций). Изготовители в своих технических условиях должны рекомендовать те параметры, которые являются решающими для такого технического обслуживания, основанного на состоянии, и определить их допустимые пределы (см. раздел 12.5.2).

Специальные типы технического обслуживания представлены ремонтным техническим обслуживанием и техническим обслуживанием с устранением неисправностей. В ремонтное техническое обслуживание входят все работы после пробоя или неисправности оборудования; техническое обслуживание с устранением неисправностей служит для корректировки типовых отказов, обнаруженных во время обслуживания или во время другого технического обслуживания, и оно должно проводиться на аналогичном оборудовании в системе [[4]].

В целях планирования наличия обслуживания изготовитель должен быть готов представить пользователю среднее время ремонта. Эти значения должны быть связаны либо с индивидуальными компонентами КРУЭ, или, по крайней мере, с конкретным отсеком выключателей однолинейной схемы.

## 12.2 Методика технического обслуживания

Пользователи должны определить стоимость их работ по техническому обслуживанию в течение ожидаемого срока службы КРУЭ. Обобщение в данном случае невозможно, однако вероятно, что в том случае, когда пользователь менее опытен и/или еще не установлена организация поддержки технического обслуживания, единственным решением по техническому обслуживанию (а именно по основному, ремонтному и профилактическому типам, включая необходимые запасные части) будет заключение контракта на выполнение таких работ с изготовителем или с третьей стороной. Ниже представлены некоторые вопросы, которые необходимо учитывать при решении о заключении субконтракта на проведение технического обслуживания [[4]]:

Капитальные расходы на средства технического обслуживания, требуемые для каждой подстанции, включая следующее:

- обращение с загрязненным газом и его компонентами
- потенциальная экономия, если не используются цеха

Требуемое специализированное оборудование

- испытательное оборудование
- специальные возможности механических компонентов

Количество подстанций

- чем больше количество подстанций, тем более дорогим становится техническое обслуживание.

Наличие и стоимость квалифицированного персонала

- какое обучение, ресурсы и средства требуются?
- может ли обучение забываться, если работы проводятся не регулярно?
- возрастной состав персонала, выполняющего техническое обслуживание.

Ожидаемый срок эксплуатации оборудования

- наличие компонентов, получаемых на обычной производственной линии изготовителя или в других источниках;
- какие-либо специализированные процессы, требуемые для компонентов.

Надежность поставки от изготовителя/третьей стороны

- обязательство изготовителя поставлять компоненты для оборудования, не выпускаемого серийно.
- вероятность того, что производитель / третья сторона не будут продолжать выпуск продукции
- наличие гарантийных контрактов. Изготовитель гарантирует определенную работоспособность и выполняет все работы, необходимые для достижения этого уровня.

Аренда оборудования у изготовителя и гарантии

- возможно соглашение с изготовителем на разработку, установку, техническое обслуживание и владение оборудованием, в то время как оно арендуется для эксплуатируемой электростанции. (Примечание: Обычно изготовитель потребует определенную форму долгосрочного финансирования или страховки). В противоположность этому могут быть предоставлены специальные гарантии, охватывающие продленный гарантийный срок или обязательства.

### 12.3 Меры безопасности при эксплуатации и техническом обслуживании

Структура этапов, которые должны учитываться при разработке мер эксплуатации и технического обслуживания, показана на Рис. 12.1.

#### 12.3.1 Техника безопасности при эксплуатации и техническом обслуживании

Безопасность при эксплуатации и техническом обслуживании достигается использованием надлежащей конструкции в следующих основных областях:

- первичные электрические цепи;
- конструкции оболочек;
- вторичные электрические цепи. См. главу 6 (системы управления и защиты, включающие в себя все функции для выполнения операций, блокировки, мониторинга, сигнализации и защиты). Специальные вопросы, связанные с КРУЭ, см. в главе 6;
- правила техники безопасности и обучение;
- документация. См. раздел 12.4.

Несмотря на то что основные соображения аналогичны правилам, используемым для КРУВ, имеется несколько позиций, типичных для КРУЭ. Они относятся к следующему:

##### 12.3.1.1 Принципы заземления первичной цепи

Для пользователя имеется несколько вариантов выполнения первичного заземления во время технического обслуживания или перерывов в работе для устранения неисправностей.

- Основной вариант, для которого не требуется сброс газа, представляет собой обеспечение достаточного количества постоянно установленных, электрически (а также механически) заблокированных заземлителей во всех возможных местах, где они могут потребоваться внутри КРУЭ для обеспечения соответствующего заземления для технического обслуживания. Для данной функции пригодны оба типа заземлителя, т.е. с возможностью обеспечения короткого замыкания (заземлители, выполняющие короткое замыкание - см. главу 5) и без этой функции (типы медленного срабатывания - см. главу 5).

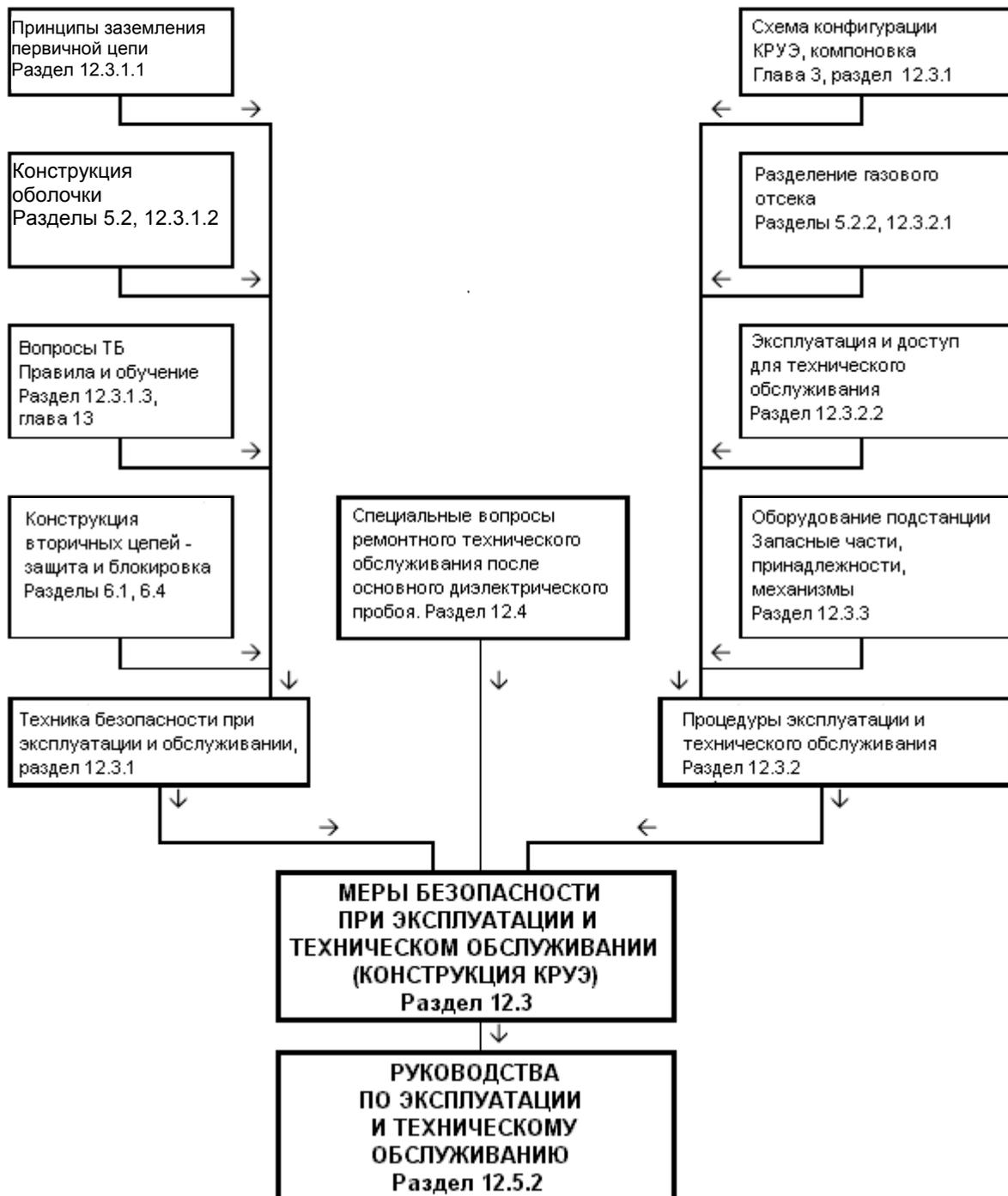


Рис. 12.1: Блок-схема для планирования обеспечения эксплуатации и технического обслуживания со ссылками на соответствующие главы и разделы

Примечание:

При использовании заземлителей с непрерывающимися контактами существует незначительная вероятность того, что при некорректной конфигурации допуска эксплуатационной системы и блокировок заземлитель с непрерывающимися контактами может быть замкнут на шину под напряжением, вызвав тем самым внутренний пробой с последующей потерей работоспособности электростанции и потенциальной опасностью для оператора. Если даже небольшая вероятность такой некорректной работы заземлителя неприемлема, тогда другим вариантом является использование заземлителей, выполняющих короткое замыкание, по крайней мере на линейных входах или по всему КРУЭ.

В соответствии с некоторыми местными правилами требуется, чтобы отсутствие напряжения проверялось до подсоединения проводника к земле. Это требование может быть выполнено при помощи дополнительного зонда напряжения. Если это невозможно при использовании оборудования КРУЭ, то может быть разрешена замена этой операции на включение заземлителя с номинальным током включения.

- КРУЭ с подсоединенными напрямую воздушными линиями или линиями, соединенными при помощи проводников с воздушной изоляцией, обеспечивают возможность заземления отсека посредством обычных заземлителей с воздушной изоляцией (заземляющих ножей на опорных изоляторах) или портативных заземляющих электродов. Тем не менее, использование портативных заземляющих электродов при более высоких уровнях напряжения в качестве единственного заземляющего устройства не всегда разрешается местными правилами.
- Другим вариантом заземления для выполнения ремонта и/или основного технического обслуживания в пределах КРУЭ являются портативные заземляющие устройства, которые могут подсоединяться в специально приспособленных местах на первичных проводниках. Для этого метода необходим сброс газа, снятие технологических крышек и обычно нужно, чтобы была принята специальная процедура установки. Тем не менее, после подробного анализа всех различных требований к обслуживанию, необходимых для основной разборки, ремонтных работ или дальнейшего расширения конкретной подстанции, может быть минимизирована потребность в установке портативного заземляющего устройства.

Для проведения такого анализа необходимо тесное сотрудничество с производителем.

В некоторых случаях портативные заземляющие устройства должны быть спроектированы для обеспечения дозаправки отсека, для того чтобы обесточить часть КРУЭ и ограничить простои во время ремонтных работ. Это представляет собой тот случай, когда заземляющее устройство находится в том же самом отсеке, что и разъединитель.

В большинстве случаев портативные заземляющие устройства для технического обслуживания рекомендуются только в качестве дополнительных (аварийных) средств. Их преимущество, заключающееся в минимальной стоимости установки, перекрывает недостатки обращения с ними. Сброс газа и снятие крышек являются дорогостоящими операциями с точки зрения трудозатрат в человеко-часах и приводят к опасности внутреннего загрязнения КРУЭ.

#### **12.3.1.2 Конструкция оболочки**

Информацию по конструкции оболочки, а также правила для оборудования под давлением см. в главе 5.2.

Все газовые зоны должны быть обеспечены средствами защиты, удерживающими или сбрасывающими избыточное давление, которое может развиваться в случае внутреннего пробоя. Необходимо избегать прогара оболочки в пределах первой ступени защиты. Срабатывание устройства сброса давления (при его наличии) должно происходить до достижения слишком высокого избыточного давления.

При использовании устройств сброса давления они должны размещаться в местах, к которым обслуживающий персонал обычно не должен иметь доступа, и отвод газа из устройства сброса давления должен быть направлен таким образом, чтобы избежать травм персонала.

Описание различных типов устройств сброса давления, их функции и конструкции координации давления см. в разделе 5.2.4.

#### **12.3.1.3 Вопросы техники безопасности**

Проверка изоляционной прокладки и/или заземляющего соединения

Отсутствие видимой изоляционной прокладки на разъединителях уже привело к изменениям в правилах техники безопасности при техническом обслуживании,

требуемым многими пользователями, в сравнении с правилами, предписанными для КРУВ. Если оболочки КРУЭ не оснащены смотровыми отверстиями, то невозможно перед началом работ по техническому обслуживанию настаивать на визуальной проверке («собственными глазами») изоляционной прокладки разъединителей и включенного положения заземлителя. Смотровые окна могут помочь в решении этого вопроса, однако с другой стороны они могут повлиять на общую целостность КРУЭ и привести к дополнительным утечкам. Пользователь должен знать то, что изоляционная прокладка в КРУЭ обеспечивает его функциональную целостность, если давление элегаза находится в допустимых пределах.

В настоящее время многие пользователи воспринимают принцип индикации внешнего положения при том условии, что он всегда верно отражает состояние внутренних контактов. Целостность такой наружной индикации описывается в документе IEC 129 и многие пользователи принимают такую методологию.

Обращение с газом

Все вопросы, связанные с обращением с газом, описаны в главе 11.

### **12.3.2 Процедуры вскрытия при эксплуатации и техническом обслуживании**

Общая конструкция КРУЭ и каждого из основных компонентов должны быть такой, чтобы обеспечить демонтаж какого-либо дефектного компонента с минимальным нарушением смежных компонентов и, предпочтительно, без перерыва в работе для более чем одной секции шинпровода и одной цепи в зависимости от специфической конфигурации шинпровода. Изготовитель КРУЭ должен предоставить пользователю руководство по методам выполнения этого требования при различных размещениях в КРУЭ.

Протяженность зон, для которых может потребоваться перерыв в работе, связанный с длительностью перерыва в их работе, представляет собой очень сложный вопрос, который в общем зависит от конструкции и конфигурации подстанции.

Необходимо обратить специальное внимание на следующее:

- a) конструкция однолинейной схемы: схема шинпровода и количество всех коммутационных устройств;
- b) проект конфигурации и схема размещения оборудования;
  - конструкция и установка заземлителей
  - оптимизация поперечно снимаемых секций оболочки
- c) разделение газовых отсеков, внутренняя конструкция основных проводников и стыков, форма и крепление барьеров
- d) доступ для эксплуатации и технического обслуживания
- e) оборудование подстанции

Позиции a) и b) были уже обсуждены в главах 3, 5 и разделе 12.3.1.1; позиции c) и d) обсуждаются ниже в разделах 12.3.2.1 и 12.3.2.2; информацию для позиции e) см. в разделе 12.3.3.

При условии, что оболочка разработана и испытана в соответствии с документами IEC 517, CENELEC или правилами для сосудов, работающих под давлением, а перегородки из литевой смолы разработаны и испытаны с учетом минимальных требований стандарта EN 50089 [24] CENELEC, в дополнение к нормальным процедурам техники безопасности и требованиям по перерыву в работе рекомендуются следующие процедуры:

- a) процедуры разборки для стандартного и основного технического обслуживания в отсеках без внутренней дуги
  - все рассматриваемые внутренние проводящие части во время разборки должны быть заземлены в течение всей процедуры (разрешаются временные заземляющие соединения)
  - откачать газ из всех соответствующих газовых отсеков (сохранить элегаз)
  - удостовериться в том, что отсутствуют утечки из смежных отсеков, находящихся под давлением
  - заполнить отсеки свежим воздухом при атмосферном давлении

- открыть отсеки и обеспечить циркуляцию воздуха внутри отсеков
  - избегать воздействия на перегородки из литевой смолы, находящихся под давлением, и ограничить работу на них до извлечения или вставки проводников со скользящими контактами
- b) процедура разборки в случае внутренней дуги
- должны выполняться все правила техники безопасности, описанные или указанные в главе 11.
  - в дополнение к позиции а) перед тем, как отсек будет открыт, давление на перегородках из литевой смолы, которые могли быть в контакте с дугой, должно быть снижено.

### 12.3.2.1 Вопросы разделения газового отсека

Оборудование должно быть разделено на достаточно независимые газовые зоны для достижения требуемой степени эксплуатационной гибкости.

Кроме вопросов эксплуатации и обслуживания существуют следующие основные правила разделения газового отсека:

- разделение газовых зон должно соответствовать принципам защиты и соответствовать частям КРУЭ, которые будут отсоединены в случае неисправности.
- для обнаружения и изоляции основных и/или незначительных неисправностей обычно требуется большее количество газовых отсеков, чем только для одних эксплуатационных соображений.
- для обеспечения более низкой вероятности преждевременного срабатывания устройства сброса давления в случае внутренней неисправности требуется уменьшенное количество газовых отсеков с большими объемами газа.
- выключатели должны быть расположены в газовой зоне независимо от другого оборудования.

Очевидно, что эти требования противоречат друг другу. Окончательное решение будет принято в результате процесса оптимизации.

Более того, традиционные методики технического обслуживания, применимые к КРУВ для изоляции цепи или компонента, основанные исключительно на требованиях электрической однолинейной схемы, больше не соответствуют КРУЭ, поскольку разделение газового отсека не обязательно соответствует физическому позиционированию основного компонента.

- Необходимо обеспечить, чтобы элегаз никогда не удалялся из отсека, который все еще находится под напряжением.
- В том случае, когда элегаз должен быть удален из газового отсека, содержащего в себе два или более устройства, обычные точки электрической изоляции могут перекрываться, что требует увеличения секции, которая должна быть заизолирована.
- Для работ по техническому обслуживанию или ремонту, включающих в себя снятие всего компонента или его частей, требуется внимательный осмотр разделения газового отсека затрагиваемой зоны, для того чтобы обеспечить отсутствие нарушений требований стандартов по технике безопасности в части работы, выполняемой рядом с барьерами под давлением. В общем случае можно утверждать, что желательно понизить давление газа в смежных газовых отсеках до уровня, немного превышающего атмосферное давление, в том случае, когда необходимо разобрать или снять основной компонент. Разумеется, существуют исключения, и каждый случай должен быть рассмотрен отдельно, как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения практичности.

Как уже было упомянуто выше, основное разделение, основанное на зонах герметичной изоляции с различной логикой разъединения во время внутреннего пробоя, может быть недостаточным. Кроме того, вследствие конструкции КРУЭ и/или в связи с местными требованиями по технике безопасности, давление элегаза должно быть снижено до определенного безопасного уровня в одном или более отсеках,

смежных с тем, который должен открыт или разобран для работы (и/или смежный отсек должен быть также открыт).

Последствия очевидны: газовые отсеки при атмосферном давлении элегаза или воздуха не способны выполнять их диэлектрические функции. Если это правило влияет на разъединитель, тогда другой разъединитель последовательно примет на себя его функции и обесточенная зона будет увеличена.

Аналогичные ситуации можно наблюдать в том случае, когда в камера разъединителя (один отсек) содержит слишком много заземлителей, или если в конфигурации КРУЭ не установлены поперечно съемные оболочки. Влияние этих условий отличается очень сильно в соответствии с различными конструкциями, однолинейными схемами и компоновками изготовителя. Пользователь должен быть осведомлен о таких сервисных ограничениях для КРУЭ и должен сравнить требования к его обслуживанию и связанные с этим затраты. Необходимы содействие изготовителя и выполнение процесса оптимизации.

При выполнении стандартного технического обслуживания необходимо избегать перерывов в работе. Можно достичь оптимальных условий для основного или ремонтного технического обслуживания (т.е. из эксплуатации будет выведена только одна цепь и/или один шинопровод), однако при значительной дополнительной стоимости. Пользователь и изготовитель должны согласовать количество одновременно выключенных цепей. Те цепи, которые являются критическими для работы сети, не должны размещаться в смежных отсеках КРУЭ. В схеме с двойным шинопроводом при пробое в селекторном разъединителе шинопровода не должен потребоваться одновременный перерыв в работе двух шинопроводов. Объем поставки КРУЭ должен включать в себя крышки и экраны, обеспечивающие работу шинопровода или цепи с некоторыми снятыми силовыми компонентами. Методы достижения специальных условий в различных отсеках КРУЭ (а также специальные инструменты, если они требуются) должны быть описаны (поставлены) в руководствах производителя.

Примечание: При условии, что выполняются требования стандарта CENELEC для изоляторов (EN 50089)[24], не требуется снижение давления в смежных камерах. Все время необходимо избегать механического воздействия на изолятор из литевой смолы, находящийся под давлением.

#### **12.3.2.2 Доступ для эксплуатации и технического обслуживания**

Существует вопрос, является ли целесообразным обеспечивать для операторов высокий уровень доступа к стандартным эксплуатационным функциям. Принимая современный принцип надежных индикаторов внешнего положения (см. «смотровые отверстия» в разделе 12.3.1.3), возможно выполнять все нормальные эксплуатационные функции на уровне земли. Тем не менее, требования к выполнению всех операций с уровня земли приводят к дополнительной стоимости различных типов наружных межсоединений (газопроводов, кабельной обвязки и т.п.). Так как существует предельно низкая частота «ручных» операций КРУЭ, то эти дополнительные расходы не выглядят как обоснованные. То же самое касается дополнительных затрат для таких мер, как постоянно установленные лестницы или перекидные мостики.

На доступ для эксплуатации и технического обслуживания к отверстиям для заполнения элегазом сильно влияет конструкция разделения и межсоединения газовых зон, которые уже описаны в разделах 5.2.2 и 12.3.2.1. В общем случае должен быть обеспечен простой доступ к манометрам и местам заправки газа. С другой стороны, с точки зрения герметичности, размер трубной обвязки должен быть минимизирован. Проблемы могут возникнуть в перемещении точек заправки газом к уровню земли вследствие необходимости использования дополнительной трубной обвязки и соединений, которые могут сами по себе привести к утечкам. Если принимается, что при современном оборудовании интенсивность газовых утечек очень низка и потребность в доступе к местам заправки во время нормального срока службы оборудования очень низкая, то такой доступ может быть обеспечен с транспортательной платформы или аналогичных временных средств. Окончательное

решение должно быть согласовано между пользователем и изготовителем.

Доступность может быть улучшена при относительно небольшом увеличении стоимости на ранней стадии проектирования учитываются соображения ремонтпригодности. Использование внутренней установки КРУЭ, обеспечение стратегически размещаемых разборных компонентов, обеспечение кранов или специально изготовленного грузоподъемного и транспортного оборудования, спроектированные должным образом опорные стальные конструкции улучшат общую доступность. Большое количество сложных разборных корпусов является наилучшим решением в случае высокой стоимости перерыва в работе КРУЭ; стандартные камеры с компонентом, который может быть срезан для удаления и использование гибких вставляемых частей для повторной сборки обычно обеспечивают альтернативное и более дешевое решение.

### 12.3.3 Оборудование подстанции

Механизмы и принадлежности

Краны или грузоподъемные инструменты, специальные инструменты и принадлежности, необходимые для эксплуатации и технического обслуживания, обычно являются теми же самыми, что и оборудование, необходимое для монтажа (см. главу 9). Количество определенных дополнительных принадлежностей зависит от методологии технического обслуживания пользователя (см. раздел 12.2) и оно должно быть согласовано между изготовителем и пользователем. Тем не менее, существуют некоторые позиции, которые должны быть на каждой подстанции КРУЭ, например, детектор утечки газа, блок дозаправки элегаза, запасной газ, точные манометры и специальные инструменты для операций (например, рукоятки). С другой стороны грузовые автомобили с оборудованием для обращения с элегазом, детекторы влажности и побочных продуктов, специальные инструменты для ремонта или основного технического обслуживания могут использоваться совместно различными подстанциями КРУЭ или быть доступными по запросу от изготовителя. Необходимо принять меры для обеспечения наличия переходников для сопряжения различных типов или моделей КРУЭ. Нельзя пренебрегать техническим обслуживанием таких инструментов и принадлежностей КРУЭ, которое может срочно потребоваться в случае возникновения какой-либо проблемы.

Запасы деталей

Научный подход для определения уровня запасных частей, который должен поддерживаться для обеспечения технического обслуживания и ремонта, может быть основан на приемлемом уровне риска, которому подвергается система и который означает вероятность неисправностей при избытке имеющихся запасных частей. Эта вероятность зависит от частоты отказов на время ремонта и/или замены и на количество эксплуатируемых подстанций КРУЭ.

Более субъективным подходом является тот, который используется на опыте пользователей и рекомендациях изготовителей. Ниже представлены некоторые факторы, которые должны учитываться при таком подходе:

- Данные по надежности для оборудования
- Тип режима эксплуатации (т.е. жесткий, наружная установка, частое срабатывание и т.п.)
- Расположение исходного изготовителя по отношению к пользователю
- Время поставки заменяемых деталей
- Капитальные затраты на хранение запасных частей
- Стратегическая важность установки
- Возраст оборудования

Изготовитель должен обеспечить, если требуется, запасные части, которые могут использоваться без сложной сборки, и их наличие на заводе.

Управление запасными частями

Особый интерес пользователей КРУЭ могут вызвать творческие подходы к традиционным методам приобретения деталей отдельными пользователями, создания

запасов и поддержания обширного ассортимента запасных частей, поскольку наиболее стратегически важные и дорогостоящие детали могут никогда не потребоваться в течение срока службы оборудования. Альтернативой, которую необходимо рассмотреть, является объединение запасных частей:

- аналогичными пользователями в обслуживаемой географической зоне
- изготовителем, связанным контрактом на обслуживание с несколькими пользователями.

Если пользователь не собирается «объединять» или создавать запасы деталей, то с изготовителем необходимо обсудить долгосрочное наличие запасных частей вне ожидаемого срока службы оборудования.

Для географически удаленных мест или там, где ограничено перемещение и импорт, рекомендуется региональное хранение ключевых компонентов (в частности, основных деталей таких коммутационных устройств, как выключатели, разъединители, заземлители или приводы). Эффективными могут быть специально разработанные комплекты для аварийных ремонтных работ, выполняемых менее обученным персоналом, до тех пор пока не будет произведен полный ремонт.

#### **12.4 Специальные вопросы ремонтного технического обслуживания после основного диэлектрического пробоя**

Несмотря на то что вероятность основной неисправности КРУЭ очень мала, в общем случае, критическое воздействие неисправности в подстанции КРУЭ на качество работы подтверждает некоторые специальные усилия, направленные на предотвращение неисправности и/или быстрый ремонт исходной конструкции КРУЭ. Неисправности можно предотвратить за счет использования контроля состояния или диагностических методик, которые разработаны для выявления зарождающихся неисправностей и для упрощения процесса замены потенциально неисправного компонента при контролируемых условиях. Время и усилия, потраченные на определение места неисправности, доступ к нему, замену деталей и восстановление эксплуатации, будут широко изменяться в исчислении десятков часов (в зависимости от сложности, размера и конструкции КРУЭ). Место расположения КРУЭ также влияет на время ремонта, например, расстояние от изготовителя, время на таможенную очистку и т.п. Обычно в данном случае требуется помощь изготовителя и время реакции изготовителя должно быть заранее согласовано.

Специальное внимание должно быть уделено вопросам определения места неисправности. Как и другие вопросы, связанные с КРУЭ, места определения неисправности должно быть обсуждено с изготовителем на ранних стадиях проектирования. Если внешние следы пробоя изоляции (такие как реакция срабатывания устройства сброса давления и последующее падение давления) отсутствуют, то широко используемые электрические реле (системы защиты) способны обеспечить только приблизительные данные о фактическом месте пробоя в рамках участка, где они установлены. Для идентификации специфического неисправного газового отсека обычно требуются специальные меры, степень которых зависит от технико-экономической оптимизации, и руководство пользователя.

Для определения местонахождения неисправности и минимизации таким образом времени простоя должны быть приняты следующие меры: Перспективные защитные реле с функциями контроля (регистрации), внутренние оперативные системы контроля, отбор проб газа, высоковольтные испытания, оптические датчики, термочувствительные краски, электромагнитные системы определения места неисправности, акустические детекторы и т.п.

Специальное внимание должно быть уделено обращению с элегазом и его регенерации. После внутренней дуги газ содержит побочные продукты разложения элегаза; другие побочные продукты возникнут после срабатывания устройства сброса давления. Информацию по обращению с элегазом см. в главе 11; процедуры регенерации см. в [[18]].

Для того чтобы подтвердить целостность изоляционной среды после основной работы

на КРУЭ, рекомендуется повторно проверить электрическую прочность изоляции затронутой части подстанции. Повторные проверки желательно проводить в следующих случаях:

- ремонт после пробоя изоляции в КРУЭ
- замена основного первичного компонента
- оперативный контроль выявляет наличие частичных разрядов в КРУЭ

Повторение испытаний изоляции на пробой переменным током может представлять собой дорогостоящую и сложную задачу для КРУЭ, которое уже было введено в эксплуатацию. В связи с этим необходимость повторных испытаний должна быть тщательно проанализирована с учетом рекомендации изготовителя и риска, связанного с отказом от выполнения повторных испытаний. Для процедур регулярного технического обслуживания или капитального ремонта, связанных с КРУЭ, обычно не требуются последующие повторные испытания изоляции на пробой. Рекомендации по процедурам и уровню испытаний см. в главе 10.

## **12.5 Основные исходные данные и дополнительные рекомендации**

Пользователь должен обратить специальное внимание на следующие дополнительные данные:

- среднее количество срабатываний в год,
- рабочие условия, такие как передача по шинопроводу.

### **12.5.1 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем**

Основные исходные данные, представляемые пользователем в его заявке, и основные исходные данные изготовителя в его конкурсных технических условиях служат для системного планирования и технико-экономической оптимизации конкретной конструкции КРУЭ. Они должны включать в себя следующее (абсолютный минимум данных помечен '\*'):

Данные пользователя, необходимые для проектных работ изготовителя:

- \* Окружающие условия эксплуатации
- \* Ожидаемое число выключателей, среднее число срабатываний в год и условия эксплуатации (например, передача по шинопроводу, коммутация специального устройства)
- \* Технические условия на требуемый контроль состояния
- Технические условия на оборудование для кондиционирования и методики, которые уже есть у пользователя
- \* Технические условия на принадлежности, которые уже есть у пользователя и которые желательно использовать
- \* Максимально разрешенные ограничения по эксплуатации во время технического обслуживания и ремонта.

Данные изготовителя, необходимые для проектных работ пользователя:

- \* Описание рекомендуемых методов контроля и их воздействие на конструкцию КРУЭ
- \* Интерпретация контрольных измерений, т.е. каким образом данные обеспечивают оценку состояния и какие действия должны быть предприняты
- \* Окружающие условия, требуемые для различных видов технического обслуживания или ремонтных работ
- \* Основное описание различных видов технического обслуживания, периоды, требуемые для такой работы, содержание такой работы и технические условия на эксплуатацию во время такой работы, время для выполнения работы
- \* Требования к специальному оборудованию, т.е. грузоподъемным механизмам и приводам, пространству для доступа и для разборки, специальным инструментам, принадлежностям и наличию запасных частей,
- Описание ограничений эксплуатации при техническом обслуживании и

капитальном ремонте (разборке) и методы определения местонахождения неисправности,

- Данные по надежности КРУЭ, например, частота возникновения второстепенных и основных неисправностей и среднее время капитального ремонта
- Предложение контрактов на долгосрочное техническое обслуживание
- Условия, используемые для долговременной поставки запасных частей
- Предложение по обучению персонала пользователя

### **12.5.2 Дополнительные рекомендации для пользователя и изготовителя**

Поскольку эффективность технического обслуживания зависит в основном от того, каким образом инструкции были подготовлены изготовителем и выполняются пользователем, следующие рекомендации (IEC 694) являются достаточно ценными:

#### **12.5.2.1 Рекомендации для изготовителя:**

Наличие руководств является ключевым для эффективного технического обслуживания электростанции. Помимо очевидно необходимого содержания эти руководства должны включать в себя изометрические чертежи или чертежи поперечных сечений, на которых показаны основные компоненты вместе с точными инструкциями по монтажу/демонтажу и рекомендованные процедуры. Инструкции по эксплуатации должны быть подробными и точными. Тем не менее, объем подготовленных инструкций по техническому обслуживанию может меняться в соответствии с методологией пользователя по проведению технического обслуживания. В том случае, если изготовитель или третья сторона заключили контракт на техническое обслуживание оборудования (включая аварийный ремонт), руководство по техническому обслуживанию может быть ограничено стандартной информацией по инспекции и/или стандартному профилактическому техническому обслуживанию. Другим крайним случаем является пользователь, который проводит все работы своим собственным персоналом, и поэтому ему требуются очень подробные руководства. Пользователь может предъявлять требования, которые противоречат стандартным процедурам изготовителя с точки зрения заказа запасных частей, систем кодировки и унификации руководства.

- 1) Изготовитель должен выпустить руководство по техническому обслуживанию, включающее, как минимум, следующую информацию:
  - Объем и периодичность технического обслуживания с учетом тока и числа операций коммутации, времени эксплуатации, окружающих условий, диагностики и контрольных проверок (при их наличии)
  - Подробное описание работ по техническому обслуживанию, т.е. процедур для различных типов технического обслуживания, ссылки на чертежи и номера деталей по каталогу, процедуры смазки, использование специального оборудования и инструментов, условия на рабочей площадке, меры безопасности, которые необходимо соблюдать
  - Полные чертежи детальной конструкции КРУЭ с четкой идентификацией сборочных узлов и предельными значениями по техническому обслуживанию основных деталей, с допусками, при превышении которых необходимо выполнить корректирующие действия
  - Технические условия на вспомогательные материалы для технического обслуживания, включая предупреждения об известной несовместимости материалов (консистентной смазки, масла, жидкостей, чистящих и обезжиривающих веществ) и предупреждения, связанные со здоровьем персонала
  - Перечень рекомендуемых запасных частей и условия их хранения
  - Перечень времени активного планово-предупредительного технического обслуживания
  - Каким образом обращаться с оборудованием в конце его срока службы с учетом требований по защите окружающей среды.

- 2) Изготовитель должен сообщить пользователю конкретного типа КРУЭ о корректирующих действиях, требуемых в результате возможных системных дефектов и неисправностей
- 3) Изготовитель должен отвечать за обеспечение непрерывного наличия запасных частей, требуемых для технического обслуживания в течение периода не менее десяти лет со времени даты окончательного изготовления конкретного типа КРУЭ.

#### **12.5.2.2 Рекомендации для пользователя:**

- 1) Если пользователь хочет выполнять собственное техническое обслуживание, он должен обеспечить, чтобы его персонал имел достаточную квалификацию, а также обладал подробными знаниями в области соответствующего типа (типов) КРУЭ.
- 2) Пользователь должен записать как минимум следующую информацию:
  - Серийный номер и тип КРУЭ
  - Дата ввода в эксплуатацию
  - Результаты всех измерений и испытаний, включая диагностику и контроль, выполненных в течение срока службы КРУЭ
  - Даты и объем выполненных работ по техническому обслуживанию
  - Архив эксплуатации, периодические записи счетчиков и индикаций срабатываний
  - Ссылки на отчеты по неисправностям
  - Запасы и потребление газа
- 3) В случае неисправности и дефектов пользователь должен составить отчет о неисправности и проинформировать изготовителя, оговорив специальные обстоятельства и принятые меры. В зависимости от природы неисправности необходимо вместе с изготовителем провести ее анализ.

### **13 Обучение**

Поскольку КРУЭ представляет собой комплектную систему подстанции, которая является уникальной в отношении конструкции каждого изготовителя, в связи с этим настоятельно рекомендуется всестороннее обучение персонала пользователя эксплуатации, техническому обслуживанию и техническим характеристикам нового КРУЭ до того, как оно будет введено в эксплуатацию.

Участники программы обучения, организованной изготовителем, должны быть выбраны для обеспечения того, что каждое из эксплуатационных подразделений получит адекватные инструкции по своей специальности для обеспечения безопасной эксплуатации КРУЭ.

Программа обучения может выполняться на рабочей площадке или в здании изготовителя. Обучение на площадке в начале установки является предпочтительным, если персонал пользователя привлечен к монтажу КРУЭ, или перед вводом в эксплуатацию для персонала по техническому обслуживанию. Преимущество обучения на рабочей площадке заключается в наличии реального КРУЭ, обеспечивающего возможность непосредственного обучения персонала пользователя. Использование средств обучения изготовителя представляет собой вариант специализированного обучения, т.е. обучения для технического обслуживания с устранением неисправностей и ремонтного обслуживания для пользователей, планирующих выполнять эти задачи без привлечения изготовителей или с сокращенным привлечением. Преимуществом завода в качестве места для обучения является наличие оборудования для выполнения различных задач при условиях, близких к реальным. Расписание занятий может быть согласовано в соответствии с необходимостью. Возможны курсы повышения квалификации.

### 13.1 Общее обучение

Общее обучение предназначено для персонала пользователя, который непосредственно привлечен на регулярной основе к эксплуатации КРУЭ. В зависимости от предыдущих знаний персонала некоторые пункты следующего расписания могут быть удалены.

Однолинейная диаграмма

- Электрические функции
- Изолированность газа в зависимости от электрических функций

Физическая конструкция

- Поперечное сечение и подробная информация по каждому типу основного компонента
- Схема компоновки подстанции
- Интерфейсы с аппаратами, не относящимися к КРУЭ, и строительные работы для элегаза
- Элегаз
- Физические параметры свежего газа
- Пределы и измерения чистоты и влажности
- Процедуры заправки газа
- Кривые давления и плотности газа подстанции
- Проверка давления и операции монитора плотности
- Физические параметры, безопасность и меры безопасности при обращении с использованным газом и газом, подвергшимся воздействию дуги

Система заземления

- Обзор конструктивных требований к системе заземления для КРУЭ
- Специальные темы КРУЭ, связанные с сверхбыстрыми переходными процессами, потенциалом прикосновения к корпусу и циркулирующими токами

Приводы

- Принципы работы
- Локальная, дистанционная работа и работа в аварийном режиме

Система управления

- Эксплуатация, блокировка и методология подачи аварийных сигналов
- Обзор примера принципиальных схем и компоновки панели

### 13.2 Обучение для установки

Данная часть обучения используется только в том случае, если персонал пользователя выполняет монтаж нового КРУЭ или расширяет существующий КРУЭ в предположении управления, выполняемого специалистами изготовителя.

- Общий обзор процедур и методов установки
- Меры предосторожности
- Основные темы и процедуры обеспечения качества
- Процедуры приемосдаточных испытаний на рабочей площадке и оценка результатов

### 13.3 Обучение эксплуатации и техническому обслуживанию

Эксплуатационное обучение основано на общем обучении и охватывает нормальные эксплуатационные меры предосторожности, проверку и техническое обслуживание (за исключением вмешательства в компоненты коммутационной аппаратуры), а также основные работы в случае неисправной работы.

Эксплуатация

- руководство по дистанционной/локальной эксплуатации
- ограничения встроенной блокировки для эксплуатации

- эксплуатационные ограничения для отдельных компонентов (например, заземлители, размыкатели)

#### Проверка и техническое обслуживание

- Обзор графиков инспекций и технического обслуживания
- Обсуждение и рекомендации, относящиеся к назначению задач технического обслуживания и требуемого специального обучения
- Использование инструментов и принадлежностей для технического обслуживания
- Дозаправка газовых отсеков при условиях включенного электропитания

#### Поиск и устранение неисправностей

- Практическая демонстрация поиска и устранения неисправностей для системы управления
- Технологии выявления места незначительной неисправности на основном оборудовании КРУЭ
- Рекомендуемые процедуры для устранения небольших неисправностей
- Рекомендуемые действия для выявления места основной неисправности, изоляция и возможное исправление.

#### Безопасные технологии

- Соответствие КРУЭ существующим безопасным технологиям пользователя
- Безопасные технологии во время работы и проверок КРУЭ.

### 13.4 Специализированное обучение

Специализированное обучение зависит от стратегии пользователя по выполнению технического обслуживания (см. главу 12). Оно необходимо до того, как пользователи выполняют основные проверки и техническое обслуживание или отреагируют на основную неисправность без поддержки изготовителем на рабочей площадке для обеспечения качества и надежности КРУЭ после таких работ.

Темы, которые должны быть охвачены, включают в себя следующее:

- Использование оборудования для обращения с элегазом и регенерации
- Эксплуатация высоковольтного испытательного оборудования
- Капитальный ремонт приводов выключателей и разъединителя
- Техническое обслуживание коммутационных компонентов внутри газового отсека
- Процедуры и безопасные технологии, требуемые для вмешательства после основной неисправности

Пользователи, пытающиеся выполнить эти задачи, должны быть осведомлены об относительной редкости таких событий, для которых потребуются подробные и современные знания и квалификация.

В противоположность этому, использование ресурсов исходного изготовителя для этих специализированных функций обеспечивает преимущества наличия опытных специалистов, выполнение которыми задачи сохранит исходную эксплуатационную надежность КРУЭ.

### 13.5 Информация, которая должна быть предоставлена пользователем и изготовителем

#### 13.5.1 Основные исходные данные пользователя

- Концепция технического обслуживания, т.е. тип технического обслуживания, которое собирается выполнить пользователь
- Число и опыт участников обучения
- Общие практические процедуры обучения для персонала рабочей площадки пользователя
- Требования к конкретному обучению
- Язык обучения

- Визовые и трудовые правила для обучения на рабочей площадке

### **13.5.2 Основные исходные данные изготовителя**

- Стандартные процедуры обучения и содержание
- Средства обучения изготовителя
- Предлагаемый график обучения (для установки, а также для периода эксплуатации (переподготовка))
- Имеющиеся языки обучения
- Документация для обучения
- Визовые требования для обучения на заводе-изготовителе

## **14 Новые разработки**

Электрические силовые системы имеют тенденцию к росту масштаба, сложности и возможностей компонентов, которые вероятно обеспечивают больше возможностей для КРУЭ. Эти обстоятельства требуют, чтобы КРУЭ было спроектировано должным образом для адекватной надежности и согласованности с окружающей средой, чтобы оно объединяло достаточные функции для облегчения технического обслуживания и проверок, выполняемых пользователями, и что стоимость срока службы минимизируются. Такие потребности могут быть обеспечены только разработкой новых технологий. Перспективные технологии включают интеллектуальную модификацию контроля во всей системе управления и защиты, включая КРУЭ. Некоторые из этих методов были уже разработаны и проверены в полевых испытаниях. Ожидается, что они найдут большее использование в КРУЭ:

### **14.1 Оперативный контроль и диагностика**

Было доказано, что КРУЭ является очень надежным и основные неисправности встречаются редко. Несмотря на это, целью разработки является дальнейшее повышение надежности КРУЭ. Для того чтобы выявить зарождающиеся неисправности, необходима подробная информация по условиям эксплуатации КРУЭ. Интенсивная разработка привела в последние несколько лет к большим преимуществам в системах мониторинга и диагностики, и ожидается, что в будущем они получат широкое распространение [[12], [19]]. Системы оперативного контроля способны получать непрерывную информацию по состоянию оборудования в то время, как оно находится в эксплуатации. Диагностические системы обеспечивают определение места, идентификацию и оценку неисправности, которая уже возникла, или потенциальной неисправности, которая была выявлена. Использование таких методов предлагает пользователю много преимуществ, таких как увеличенная функциональность и улучшение технических параметров [[12]]. Они могут использоваться для индикации аномалий в КРУЭ, обеспечивая возможности планирования и принятия необходимых мер при обеспечении непрерывной эксплуатации.

Системы мониторинга также могут использоваться для внедрения новых методологий технического обслуживания, таких как основанного на состоянии или направленного на обеспечение надежности [[7]]. В таких случаях техническое обслуживание не проводится на периодической основе, а выполняется в зависимости от условий эксплуатации, количества операций, возраста и т.п. Данная информация может обеспечить оценку конца срока службы КРУЭ. Это представляет особый интерес, поскольку опыт показал, что состояние КРУЭ в большинстве случаев лучше, чем прогнозируемое после нескольких лет эксплуатации, и может ожидаться увеличенный срок службы. Большинство упомянутых выше возможностей существенно влияют на снижение стоимости срока службы, оправдывая во многих случаях более высокую исходную стоимость установки КРУЭ.

Таблица 14.1 Параметры контроля и датчики КРУЭ      Функция: Изоляция

Параметр	Тип датчика	Использование контроля								Периодический или непрерывный	Важность контроля	Состояние разработки
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Плотность элегаза (величина)	Ареометр	•		•	•					Периодический Непрерывный	Высокая Высокая	Развитое Некоторые приложения
	Датчик плотности	•		•	•	•						
Плотность элегаза (уровень)	Реле плотности	•								Непрерывный	Высокая	Развитое
	Датчик плотности											
Частичный разряд	Акустическая эмиссия			•	•				•	Периодический	Средняя	Некот. прил.
	Обычная разность потенциалов СВЧ								•			
	Разложение газа			•	•				•	Непрерывный	Средняя	Некот. прил.
	Трубка кислотности			•	•	•			•			
Качество элегаза	Измеритель кислорода				•				•	Периодический	Низкая	Развитое
	Измеритель точки росы				•				•			
	Трубка кислотности				•	•			•	Периодический	Низкая	Развитое

Таблица 14.2 Параметры контроля и датчики КРУЭ      Функция: Коммутация

Параметр	Тип датчика	Использование контроля								Периодический или непрерывный	Важность контроля	Состояние разработки
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Время срабатывания выключателя	Вспомог. выключ.	•		•	•				•	Непрерывный	Высокая	Некоторые приложения
	Основной контакт	•		•	•			•	Периодический			
	Ток обмотки			•	•			•		•	Непрерывный	Высокая
	Бесконтактные датчики	•		•	•			•	•	Непрерывный		
Скорость срабатывания выключателя	Ход (электронный)			•	•			•	•		Периодический	Высокая
	Ход (оптический)			•	•			•	•	Непрерывный		
	Бесконтактные датчики			•	•			•	•		Непрерывный	Высокая
Положение	Вспомогат. выключатель	•				•				Непрерывный		
	Бесконтактные датчики	•				•					Непрерывный	Высокая
	Оптические датчики	•				•				Непрерывный		
Эрозия контакта	Индикаторы износа			•					•		Периодический	Средняя
	I <sup>2</sup> t Мониторы			•					•	Непрерывный		
Время зарядки пружины	Таймер			•					•		Непрерывный	Средняя
Состояние пружины	Оптический датчик			•	•			•	•	Непрерывный	Средняя	Ограничен.
Давление механизма	Манометр	•							•	Периодический	Средняя	Развитое
	Датчик	•				•			•			
Пуски насоса	Счетчик			•	•				•	Непрерывный	Средняя	Развитое

Таблица 14.3 Параметры контроля и датчики КРУЭ      Функция: Другие

Параметр	Тип датчика	Использование контроля								Периодический или непрерывный	Важность контроля	Состояние разработки
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Температура контакта	Температ. бака	•		•	•					Непрерывный	Средняя	Некоторые приложения
	ИК-камера			•	•							
Напряжение	Электродо- магнитный ТН	•	•					•		Непрерывный	Высокая	Развитое
	Емкостной ТН	•	•					•				
Ток	ТТ с	•	•					•		Непрерывный	Высокая	Развитое

	железным сердечником ТТ с воздушным сердечником Оптический датчик	•	•				•			Непрерывный	Высокая	Некоторые приложения
		•	•				•			Непрерывный	Высокая	Ограничен.
Детектор внутренней дуги	Оптический детектор Реле давления					•		•		Непрерывный	Низкая	Развитое
						•				Непрерывный	Низкая	Развитое
Разрядник Ток утечки	Амперметр	•				•				Периодический	Средняя	Развитое

Использование мониторинга

- |  |   |
|--|---|
| 1. Состояние оборудования                | 5. Обеспечение эксплуатации и технического обслуживания |
| 2. Измерение тока и напряжения           | 6. Активное управление                                  |
| 3. Диагностика для прогноза ТО           | 7. Приемосдаточные испытания                            |
| 4. Диагностика для предотвращения отказа | 8. Оценка срока службы                                  |

Выбор параметров, которые должны контролироваться, и датчиков, которые должны использоваться, зависит в первую очередь от цели использования системы мониторинга. Обзор параметров мониторинга и диагностики КРУЭ представлен в таблицах 14.1 - 14.3 [[12]]. Параметры распределены по категориям в соответствии с основными первичными функциями и оценены по их потенциальному использованию.

## 14.2 Нетрадиционные ТН и ТТ

Более компактные и легкие трансформаторы в отличие от используемых в настоящее время в КРУЭ должны стать пригодными к употреблению в ближайшее время [[20]]. В энергетике эти так называемые датчики или преобразователи зависят от различных фундаментальных принципов. В представленной ниже таблице дан обзор используемых и действующих на сегодня принципов.

Таблица 14.4 Принципы датчиков и преобразователей для измерения тока и напряжения

Технология	ТН	ТТ
Полустандартные	Резистивные (R) - делители Емкостные (C) - делители Смешанные (RC) - делители	Миниатюрный железный сердечник Воздушный сердечник типа Роговского
Оптические	Датчик на эффекте Покеля Обратный пьезоэффект Интерферометрический датчик	Эффект Фарадея – параметрический датчик Эффект Фарадея – интерферометрический датчик (типа Сагнак)

Вначале были разработаны и использовались преобразователи на полустандартном принципе (см. таблицу 14.4). Для измерения напряжения в КРУЭ в течение более 20 лет использовались хорошо известные принципы делителя. Эта технология никогда не достигла экономического успеха из-за дорогостоящих усилителей мощности, требуемых для поддержки стандартного интерфейса 100 В и высоких нагрузок вторичной цепи. Однако в настоящее время цифровое вспомогательное оборудование с небольшой потребностью в электроэнергии привело к новым работам по стандартизации маломощных интерфейсов (IEC 44, IEC 1869). Это снова делает полустандартные преобразователи многообещающими кандидатами для простого и эффективного измерения напряжения.

Для измерений тока возможно сделать ТТ миниатюрными за счет железных сердечников, если нет необходимости в высоких нагрузках вторичной цепи. Эти миниатюрные ТТ обеспечивают превосходную точность и стандартную переходную характеристику для использования в системах защиты. Процесс миниатюризации

ограничен из-за эффектов насыщения, и если существуют очень строгие требования к переходной характеристике, то он может быть неприемлем.

В преобразователях типа пояса Роговского отсутствуют эффекты насыщения для измерений тока. Тем не менее, для этого типа датчиков требуются сложные интегральные схемы и компенсация эффектов компонента электрического поля. Если требуется высокая точность, нужно также компенсировать температурные эффекты.

Переходные явления (например, сверхбыстрые переходные процессы) оказывают существенное влияние на реакцию всех полустандартных преобразователей. В связи с этим для таких систем часто требуются меры предосторожности против переходных процессов.

С учетом недавних значительных достижений в оптических технологиях в настоящее время появились настолько привлекательные оптические датчики, что были разработаны и применяются оптоволоконные трансформаторы с использованием оптоволоконных датчиков тока или напряжения. Оптические измерения имеют следующие эксплуатационные характеристики:

- Простая изоляция
- Сигналы не содержат электромагнитного шума
- Измерения возможны в широком диапазоне частот
- Сигналы могут передаваться на большие расстояния

Оптические трансформаторы тока основаны на принципе, по которому эффект Фарадея преобразует напряженность магнитного поля, генерируемую вокруг проводника в световые колебания. Если этот принцип измерения используется для электрических силовых систем, то он обладает преимуществами для обеспечения целостности изоляции, поскольку в высоковольтных компонентах датчика отсутствуют электрические цепи. В системе передачи сигнала свет может эффективно использоваться для снижения шума. С другой стороны, там, где такие оптоволоконные датчики тока были внедрены в практическое использование для измерения токов в электрических силовых системах, возникли некоторые проблемы, включая эффекты магнитных полей других фаз, вариации источника света (на стороне эмиссии света), тепловые характеристики цепи фотоэлектрического преобразования, шум и т.п. (на стороне приемника) и особенно тепловые характеристики и чувствительность элементов Фарадея. Для компенсации этих эффектов могут использоваться узлы датчиков, основанных на интерферометре Сагнака.

Датчик определения напряжения (оптический ТН) в основном использует эффект Покельса для измерения напряженности электрического поля, приложенного к элементу Покельса, за счет его преобразования в колебания света. Было разработано несколько конструкций в зависимости от методов модуляции и типов элемента Покельса. Для оптоволоконных датчиков напряжения аналогично датчикам тока также являются важными чувствительность элементов Покельса и тепловые характеристики. Другой тип оптического датчика напряжения использует обратный пьезоэлектрический эффект. Изменение геометрии (толщины) пьезоэлектрического кристалла из-за электрического поля воспринимается оптоволоконном.

Исследования и разработки технологий оптических измерений получили дальнейшее развитие, сконцентрировавшись на разработке оптоволоконных датчиков с более высокой чувствительностью и лучшими тепловыми характеристиками, для того, чтобы достичь более высокого уровня надежности. После поверочных испытаний характеристик в полевых условиях ожидается, что они найдут более широкое применение в КРУЭ.

Широкое применение новых датчиков и преобразователей для измерения тока и напряжения в КРУЭ также зависит от успеха работ по стандартизации. Существует необходимость в общем утвержденном связующем звене, которое бы поощряло изготовителей разрабатывать и обеспечивать новое вспомогательное оборудование, такое как реле защиты, устройства входа/выхода и измерители, поддерживающее эту

новую технологию датчиков.

### **14.3 Интеграция устройств защиты и управления в КРУЭ**

Последние достижения в области электроники обеспечили интеграцию в системы защиты и управления подстанций функций, эквивалентных или превышающих функции обычных систем, при помощи центрального процессорного устройства (ЦПУ), оснащенного программными модулями, и такие системы должны будут широко использоваться. Размер таких систем может быть существенно снижен для того, чтобы обеспечить возможность их индивидуальной установки в панели КРУЭ. Использование электронных устройств между КРУЭ и диспетчерской обеспечивает передачу сигнала через небольшое количество оптоволоконных кабелей или электрических (последовательных) кабелей, исключая необходимость большого числа обычных многожильных кабелей, для установки которых требуются большие затраты труда на рабочей площадке. Использование электронных устройств в управлении и защите КРУЭ будет развиваться вместе с разработкой различных датчиков.

## **15 Приложения**

### **15.1 Приложение А – Проверки на рабочей площадке**

Важной частью процедуры испытаний на рабочей площадке являются испытания изоляции основной цепи на пробой. Цель этих испытаний, объекты испытаний и общие процедуры испытаний описаны в документе IEC 517. В общем случае напряжение испытания на рабочей площадке должно быть 80% от номинального выдерживаемого напряжения (эта величина соответствует обратной величине  $K_s$ , которая учитывает разбросы свойств изоляции всей подстанции КРУЭ на рабочей площадке после транспортировки и сборки; см. раздел 4.4). При определенных обстоятельствах и в некоторых странах испытания на рабочей площадке проводятся при пониженном напряжении (Приложение ССЗ к документу IEC 517).

Во многих случаях по практическим и экономическим соображениям предпочтительным является метод испытаний. В связи с этим рекомендуется заключить соглашение между изготовителем и пользователем по целесообразной процедуре испытаний. Тем не менее, наиболее экономичные методы испытаний подвергаются изменениям благодаря успехам в развитии физических и технологических методов.

В настоящее время для испытаний на рабочей площадке используются различные формы кривой напряжения. Испытания напряжением переменного тока наиболее чувствительны при определении свободных частиц, в то время как испытания грозovým разрядом особенно чувствительны при выявлении аномальных конфигураций поля на деталях под напряжением. Для обоих типов, а также и других типов дефектов весьма эффективными являются измерения ЧР, если шум может быть эффективно подавлен и может быть достигнута необходимая чувствительность. Иногда номинальное выдерживаемое напряжение не задается для формы кривой напряжения, прикладываемого на рабочей площадке. В данном случае характеристики изоляции принимаются во внимание с помощью коэффициента преобразования испытания. По отношению к заменяемому стандартному напряжению испытательное напряжение на рабочей площадке должно равняться 80% от номинального выдерживаемого напряжения, умноженного на коэффициент преобразования испытания.

В прошлом использовались следующие испытания: поскольку свободные частицы представляют собой наиболее часто встречающиеся дефекты, то испытание напряжением переменного тока рассматривается как наиболее существенное. Для номинальных напряжений до 245 кВ обычно проводилось только это испытание. В случае более высоких диапазонов напряжения часто дополнительно проводились испытания молниевым разрядом. Испытания напряжением переменного тока с

чувствительными измерениями частичного разряда (ЧР) постепенно вытесняют испытания молниевым разрядом. Помимо обычного метода измерения ЧР в соответствии с документом IEC 270 все шире используются современные методы с повышенной чувствительностью и возможностью определения положения и идентификации дефекта [[21], [22]].

Если стандартная форма кривой напряжения не может быть реализована, коэффициент преобразования испытания должен рассматриваться следующим образом:

- Для напряжения переменного тока с частотой от 30 до 300 Гц, которая генерируется резонансными цепями, коэффициент преобразования испытания по отношению к напряжению промышленной частоты будет 1,0.
- Иногда проводятся испытания коммутационным импульсом. Для диапазонов напряжения, где не задано номинального выдерживаемого напряжения коммутационного импульса, коэффициент преобразования испытания принимается равным 0,75 пикового значения грозового разряда и при 80% коэффициенте для испытания на рабочей площадке в качестве пикового значения принимается 60% от номинального выдерживаемого напряжения грозового разряда.
- Импульсные генераторы, производящие двойные экспоненциальные импульсы, отвечающие требованиям IEC 71-1 являются дорогостоящими. В связи с этим обычно используются неустановившиеся грозовые импульсы. Более того, длительность фронта выбрана около 10 мкс для того, чтобы достичь ровного напряжения в КРУЭ. Для таких длительностей фронтов коэффициент преобразования испытания равен 0,9. В связи с этим напряжение испытания на рабочей площадке должно быть 70% от номинального напряжения грозового разряда.

В документе WG 33/23.12 CIGRE рассмотрена эффективность используемых испытаний при помощи современных методов измерения ЧР и улучшенных процедур испытаний, предложенных в [[23]]. Амплитуды напряжения для испытаний на рабочей площадке связаны с номинальным выдерживаемым напряжением грозового импульса  $U_p$ . Должны выбираться следующие значения:

- Напряжение грозового импульса ( $U_{LIот}$ ) с длительностью фронта 5 и 15 мкс.

$$U_{LIот} = 0,9 \cdot 0,8 \cdot U_p = 0,7 U_p$$

- Стандартное напряжение коммутационного импульса ( $U_{sit}$ )

$$U_{sit} = 0,75 \cdot 0,8 \cdot U_p = 0,60 U_p$$

- Напряжение переменного тока ( $U_{act}$ ) в диапазоне частот 30 . . . 300 Гц

$$U_{act} \text{ (rms value)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0,63 \cdot 0,8 U_p = 0,36 U_p$$

На основе полученного опыта рекомендуется следующая улучшенная процедура для испытаний на рабочей площадке.

Для номинальных напряжений ниже 170 кВ только одно испытание переменным током при  $U_{act}=0,36 U_p$  может быть приемлемо с учетом низкой частоты отказов при эксплуатации. Если такое испытание не может повлиять, то должно быть проведено испытание коммутационным импульсом с  $U_{sit}$  и временем до пика более 100 мкс. Для более высоких диапазонов напряжения должно быть проведено такое испытание переменным током с  $U_{act}$  вместе с измерениями ЧР перед и после испытания переменным током. В случае обычного метода ЧР согласно IEC 270 кажущийся заряд должен быть ниже 5 пКл. Измерения ЧР должны быть проведены при  $0,8 U_{act}$ . Если используются современные методы (СВЧ, УВЧ, акустический метод) то сигнал должен быть ниже эквивалентного значения. (Эти эквивалентные значения рассматриваются

совместной рабочей группой WG 33/23.12 и WG 15.03).

Если из-за фонового шума требуемая чувствительность 5 пКл или эквивалентное значение не может быть достигнуто, то для дополнительной гарантии состояния диэлектрика рекомендуются испытания молниевым импульсом с  $U_{LI10t}$ .

## **15.2 Приложение В – Гексафторид серы (элегаз) в подстанциях – Заявление по охране окружающей среды [[11]]**

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Элегаз не вызывает разрушения стратосферного озонового слоя.
2. На данный момент влиянием элегаза на увеличение «парникового эффекта» можно пренебречь, поскольку его концентрация в атмосфере невелика и не будет увеличиваться до конца следующего столетия при условии минимальных утечек из оборудования, правильного повторного использования и надлежащего обращения.
3. Выбросы элегаза электроэнергетическими предприятиями в атмосферу составляют невысокий процент.
4. Элегаз является самой эффективной средой для обеспечения надежной изоляции и эффективной коммутации и незаменим при эксплуатации электрооборудования.

На каждой подстанции, в которой используется оборудование с элегазом, должна быть предусмотрена табличка, содержащая следующие инструкции:

1. Элегаз запрещается выпускать в атмосферу намеренно
2. Утечки элегаза из оборудования должны быть сведены до минимума путем надлежащего выполнения монтажа и правильного обращения
3. Элегаз должен использоваться повторно
4. Необходимо соблюдать стандарты на повторное использование элегаза и чистоту использованного элегаза, которая частично должна быть восстановлена

**Необходимо помнить:**

**Мы можем добиться значительных положительных результатов используя элегаз!**

Подготовлено руководство по обработке элегаза с подробной информацией о его повторном использовании в силовом электрооборудовании и окончательной утилизации. [18].

## 16 Литература

- |      |  |   |   |
|------|--|---|---|
| [1]  | Cigre WG 23  | General guidelines for the design of outdoor AC substations, CIGRE Brochure No. 69, 1992  | Общее руководство по проектированию наружных подстанций переменного тока. Брошюра CIGRE №69, 1992 г.  |
| [2]  | Lewis, Petterson, Boeck, DeHeus, Itoh, Jones, Kopejtkova, Mauthe, Mazzoleni, Moloney, O`Connell, Oswald, Voisin, Welch, Lightle, Heinemann | Earthing of GIS - an application guide; ELECTRA No. 151, 1993   | Заземление КРУЭ – руководство по применению; ELECTRA № 151, 1993 г.   |
| [3]  | Kopejtkova, Molony, Kobayashi, Welch   | A twenty-five year review of experience with SF <sub>6</sub> gas insulated substations (GIS) CIGRE Paris 1992, paper 23-101         | Обзор 25-летнего опыта эксплуатации подстанций с элегазовой изоляцией CIGRE Париж 1992 г., доклад 23-101                                    |
| [4]  | Jones, Kopejtkova, Kobayashi, Molony, O`Connell, Welch   | GIS in service - experience и recommendations CIGRE Paris 1994, paper 23-104  | КРУЭ в эксплуатации – опыт и рекомендации CIGRE Париж 1994 г., доклад 23-104  |
| [5]  | Pettersson, Wahlström, Erikson, Pettersson   | Life cycle cost evaluation for gas-insulated substations including a method to determine outage costs CIGRE Paris 1986, paper 23-08 | Оценка стоимости срока службы подстанций с элегазовой изоляцией, включая метод определения стоимости простоя CIGRE Париж 1986, доклад 23-08 |
| [6]  | Porter, Lightle, Itoh, Kobayashi, Pettersson   | Indoor and outdoor GIS and the environmental issues CIGRE Paris 1990, paper 23-305  | Внутренние и наружные КРУЭ и проблемы охраны окружающей среды CIGRE Париж 1990, доклад 23-305   |
| [7]  | Wahlstroem, Aoshima, Mino, Lajoie-Manzenc, Torgerson, Zomers   | The future substation: a reflective approach CIGRE Paris 1996, paper 23-207   | Будущая подстанция: рефлексивный подход CIGRE Париж 1996, доклад 23-207   |
| [8]  | CIGRE WG 33  | Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines CIGRE Brochure No. 63, 1990                      | Руководство по процедурам оценки характеристик грозового разряда на линиях электропередачи Брошюра CIGRE № 63, 1990                         |
| [9]  | Erikson, Weck  | Simplified procedures for determining representative substation lightning перенапряжения CIGRE Paris 1988, paper 33-16              | Упрощенные процедуры определения представительного перенапряжения от грозового разряда CIGRE Париж 1988, доклад 33-16                       |
| [10] | Alvinson, Ardito, Boeck, Feser, Fujimoto, Grandl, Koenig, Lightle, Luoni, Luxa, Müller, Rowe, Sabot  | Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations   | Сверхбыстрые переходные явления, связанные с подстанциями с   |

- |      |  |  |   |
|------|--|--|---|
|      |  | CIGRE Paris 1988, paper 33-13,   | элегазовой изоляцией CIGRE Париж 1988, доклад 33-13,  |
| [11] | Mauthe, Niemeyer, Pryor, Probst, Bräutigam, O`Connell, Pettersson, Morrison, Poblitzki, Koenig | SF <sub>6</sub> and the global atmosphere<br>ELECTRA No. 164, 1996   | Элегаз и глобальная атмосфера<br>ELECTRA № 164, 1996  |
| [12] | Jones, Beierl, Colombo, Ebersohl, Henderson, Kobayashi, Pettersson, Wester                     | Guidelines for monitoring, control и supervision of GIS incorporating advanced technologies<br>CIGRE Paris 1996, paper 23-203                        | Руководство по управлению, контролю и инспекции перспективных технологий, включающих КРУЭ<br>CIGRE Париж 1996, доклад 23-203  |
| [13] | Janssen, Degen, Heising, Bruvik, Colombo, Lanz, Fletcher, Sanchis                              | Final report of the second international enquiry on high voltage circuit-breaker failures и defects in service<br>CIGRE Report No. 83, 1994          | Итоговый отчет по второму международному опросу по отказам и дефектам при эксплуатации высоковольтных силовых выключателей<br>Отчет CIGRE № 83, 1994                        |
| [14] | Clarenne, Ebersohl, Vigreux, Voisin  | Design of the earthing system, low voltage wiring and electronic equipment<br>ELECTRA No. 126, 1989  | Конструкция системы заземления, низковольтной обмотки и электронного оборудования<br>ELECTRA № 126, 1989  |
| [15] | Strnad, Reynaud  | Design aims in HV substations to reduce electromagnetic interference (EMI) in secondary systems<br>ELECTRA No. 100, 1985                             | Цели проектирования в высоковольтных подстанциях для снижения электромагнитных помех (ЭМП) во вспомогательных системах<br>ELECTRA № 100, 1985                               |
| [16] | Aanestad, Deter, Röhler, Lewis, Strnad   | Substation earthing with special regard to transient ground potential rise design aims to reduce associated effects<br>CIGRE Paris 1988, paper 23-06 | Заземление подстанции со специальным учетом целей проектирования роста переходного потенциала земли для снижения соответствующих эффектов<br>CIGRE Париж 1988, доклад 23-06 |
| [17] | Mauthe, Pettersson, Gleeson, König, Lewis, Molony, O`Connell, Porter, Niemeyer                 | Handling of SF <sub>6</sub> and its decomposition products in Gas Insulated Switchgear (GIS)<br>ELECTRA No. 136 and 137, 1991                        | Обращение с элегазом и продуктами его разложения в комплектном распределительном устройстве с элегазовой изоляцией (КРУЭ)<br>ELECTRA № 136 и 137, 1991                      |
| [18] | Mauthe, Pryor, Niemeyer,   | «SF <sub>6</sub> Recycling Guide -   | «Руководство по   |

- |      |  |  |   |
|------|--|--|---|
|      | Probst, Poblitzki,<br>Morrison, ,<br>Bolin, O`Connell, Henriot   | Reuse of SF6 Gas in<br>Electrical Power<br>Equipment и Final<br>Disposal»<br>ELECTRA No.173, 1997  | регенерации элегаза -<br>Повторное<br>использование элегаза в<br>силовом<br>электрооборудовании и<br>окончательное<br>удаление»<br>ELECTRA №173, 1997 |
| [19] | Vigreux  | Application of condition<br>monitoring techniques in<br>gas insulated substations<br>ELECTRA No. 134, 1989                               | Использование методов<br>контроля состояния в<br>подстанциях с элегазовой<br>изоляцияй<br>ELECTRA № 134, 1989   |
| [20] |  | Holt New principles for<br>current and voltage<br>measurement и aspects of<br>application in GIS<br>ELECTRA No. 121, 1988                | Новые принципы Хольта<br>для измерения тока и<br>напряжения и вопросы их<br>применения в КРУЭ<br>ELECTRA № 121, 1988                                  |
| [21] | Boeck, Cooke, Dale,<br>Diessner, Fujimoto,<br>Hampton, Henriksen,<br>Mudra, Neumann, Petit,<br>Pigini, Rein, Schlicht,<br>Slowikoska, Tagashira,<br>Voison, Fruth, Hiesinger,<br>Koltunowicz, Leijon,<br>Lundgaard   | Diagnostic methods for<br>GIS insulating systems<br>CIGRE Paris 1992, paper<br>15/23-01  | Методы диагностики для<br>изоляционных систем<br>КРУЭ<br>CIGRE Париж 1992,<br>доклад 15/23-01   |
| [22] | Boeck, Blackburn, Cooke,<br>Dale, Diessner, Fujimoto,<br>Hampton, Mudra,<br>Neumann, Petit, Pigini,<br>Rein, Schlicht,<br>Slowikowska, Tagashira,<br>Vlastos, Voisin, van der<br>Zel,<br>Albiez, Braun, Ermel,<br>Herbst, Koltunowicz,<br>Lundgaard, Maulat,<br>Nakanishi, Yamamoto,<br>Wohlmuth | Effects of particles on the<br>GIS insulation and the<br>evaluation of relevant<br>diagnostic tools<br>CIGRE Paris 1994, paper<br>15-103 | Влияние частиц на<br>изоляцию КРУЭ и оценка<br>соответствующих<br>диагностических<br>инструментов<br>CIGRE Париж 1994,<br>доклад 15-103               |
| [23] | Sabot, Koltunowicz, Boeck,<br>Buesch, Colombo,<br>Diessner,<br>Doin, Excoffon, Farish,<br>Feser, Frohlich, Fujimoto,<br>Irwin, Herbst, Lanz, Leijon,<br>Lundgard, Neumann, Petit,<br>Shani, Van Der Merwe,<br>Welch, Yamagiwa, Zaima   | Insulation coordination of<br>GIS: return of experience,<br>on site tests and diagnostic<br>techniques<br>ELECTRA No. 176, 1998          | Координация изоляции<br>КРУЭ: обмен опытом,<br>испытания на рабочей<br>площадке и методы<br>диагностики<br>ELECTRA № 176, 1998                        |